

Graziele da Luz

**Avaliação da forma de adição de nanossílica nas
propriedades mecânicas de pastas de cimento**

Florianópolis

2015

Graziele da Luz

Avaliação da forma de adição de nanossílica nas propriedades mecânicas de pastas de cimento

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Engenheiro Civil

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Centro Tecnológico

Curso de Engenharia Civil

Orientador: Prof. Philippe Jean Paul Gleize

Florianópolis

2015

Graziele da Luz

Avaliação da forma de adição de nanossílica nas propriedades mecânicas de pastas de cimento / Graziele da Luz. – Florianópolis, 2015-

101 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Philippe Jean Paul Gleize

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Centro Tecnológico

Curso de Engenharia Civil, 2015.

1. Engenharia Civil. 2. Cimento Portland. 3. Nanossílica. 4. Forma de Adição.
5. Ensaio de Resistência Mecânica. I. Philippe Jean Paul Gleize. II. Universidade Federal de Santa Catarina. III. Título

CDU 02:141:005.7

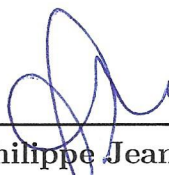
Graziele da Luz

Avaliação da forma de adição de nanossílica nas propriedades mecânicas de pastas de cimento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção de título de Engenharia Civil ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Florianópolis, 30 junho de 2015

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Philippe Jean Paul Gleize
Orientador

Janaíde Cavalcante Rocha
Professora

Fernando Pelisser
Professor

*Este trabalho é dedicado à Deus, minha família e meu namorado,
que são a razão da minha existência, meu porto seguro.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus que nunca me abandonou, nem se quer um momento, me deu inspiração, paciência, e colocou em meu caminho várias pessoas que foram de grande ajuda para a realização desse trabalho.

À minha mãe e minha irmã Erondina e Eliane que me deram apoio e me incentivaram a não desistir.

Ao meu namorado, Felipe Carraro, que me acompanhou e ajudou em todas as etapas desse trabalho, esteve ao meu lado todos os dias, sempre me dando a força que eu precisava para continuar.

Às minhas amigas Ingrid, Livia, Marina, Meire, Sheila e Yara pelas muitas orações e pelas palavras de conforto que me deram.

Ao professor Philippe Gleize que pacientemente respondia a todos os meus questionamentos; pela oportunidade e o tempo dedicado à esse trabalho.

À Nágilla de Azevedo que me ensinou bastante sobre os ensaios realizados e sempre tirava dúvidas sobre os mesmos quando eu as tinha.

Ao técnico do laboratório Nilton, pela ajuda nos ensaios e pelos conselhos e incentivos dados.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

Resumo

A adição de nano materiais permite o aumento da reatividade e da área de contato entre as superfícies, o que proporciona diversas vantagens em termos de reforço e eficiência.

Existem muitas pesquisas mostrando as vantagens da adição de nano materiais. Grande parte delas trata-se da adição da nanossílica, que além do aumento da área de contato entre as superfícies, apresenta reatividade pozolânica: a nanossílica reage com o hidróxido de cálcio (um dos produtos da hidratação do cimento Portland) formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H, onde $C = CaO$, $S = SiO_2$ e $H = H_2O$). Desta forma, aumentando a quantidade de C-S-H, obtém-se uma maior densificação da matriz, o que proporciona maior resistência à compressão, poros menores e maior durabilidade.

Apesar do grande número de trabalhos que mostram a influência da nanossílica nas propriedades dos compósitos do cimento, os efeitos não estão bem caracterizados ainda, e algumas discrepâncias e diferenças em resultados são observadas.

Alguns pesquisadores relatam um progressivo aumento de resistência à compressão com o aumento do teor de nanossílica de 0,2 até 10-12% em relação ao peso de cimento. Em contraste, outros encontraram um máximo de ganho de resistência adicionando 0,6% de nanossílica em relação ao peso de cimento. Esse ganho de resistência caiu para 19% quando a quantidade de nanossílica era aumentada de 0,6% para 0,8% em relação ao peso de cimento. Essas discrepâncias podem ser oriundas da forma da adição da nanossílica.

O objetivo deste estudo foi analisar a forma de adição de nanossílica (diretamente em pó e após sonicação na água) em algumas propriedades de pastas de cimento tais como hidratação do cimento, trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade dinâmico, distribuição de poros e área superficial. Para a confecção das pastas de cimento, foi utilizado cimento Portland com adição de fíler calcário (CP II-F). A relação água/cimento utilizada foi de 0,40, sendo utilizado também um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos a fim de alcançar a mesma trabalhabilidade de amostras sem adição de nanossílica. Foram moldados corpos de prova cilíndricos com 2 cm de diâmetro e 4 cm de altura e prismáticos de $10 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$, com e sem superplastificante, com 2,5% de adição e sem nanossílica, para fins de comparação.

Foi constatado, no ensaio de calorimetria, que a adição de nanossílica afeta a hidratação do cimento, fazendo com que esta ocorra mais rápido, implicando em maiores resistências iniciais à compressão, principalmente aos 3 dias, chegando à 28% no caso de corpos de prova cilíndricos, adicionando nanossílica tanto na forma de pó quanto sonicada em água e ambas com o uso de superplastificante.

Com a análise BET foi possível observar que a adição de nanossílica alterou a porosidade das pastas de cimento, para poros menores que 150 nm, mas essa alteração não implicou

em mudanças significativas na resistência à compressão.

Observando as resistências à compressão e à tração na flexão, foi possível notar que a sonicação da nanossílica em água não tem efeito sobre as mesmas.

Palavras-chaves: Cimento Portland. Nanossílica. Forma de adição. Aditivo Superplastificante. Ensaio de Resistência Mecânica.

Abstract

The addition of nano materials allows the increasing of reactivity and contact area between surfaces, which provides many advantages in terms of strength and efficiency.

There are many researches showing the advantages of nano materials addition. A large amount of them corresponds to nanosilica addition, which besides the increasing in contact area between surfaces, presents pozzolanic reactivity: it reacts with calcium hydroxide (one of the products from the Portland cement hydration) yielding calcium silicate hydrate (C-S-H, where $C = CaO$, $S = SiO_2$ e $H = H_2O$). This way, increasing the amount of C-S-H, a larger matrix densification is obtained, which provides the increasing of compressive strength, smaller pores and the improvement of durability.

Although numerous papers have studied the influence of nanosilica on the properties of cement composites, their effects have not been adequately characterized yet, and some discrepancies and differences in results are witnessed.

Some researchers also reported a progressive increase of compressive strength with increasing nanosilica content over the range of nanosilica dosages from 0.2 to 10-12 wt. of cement. In contrast, some others found a maximum strength gain for a 0.6 wt% of cement. This strength gain reduced to 19% as the nanosilica content was increased from 0.6 to 0.8wt%. These discrepancies might be originated from the nanosilica addition form.

This study objective was to analyze the nanosilica addition form (directly in powder and after sonication in water) on some properties such as workability, compressive and tensile strength, dynamic elastic modulus, pore distribution and surface area. To the production of the cement pastes, a Portland cement with calcareous filler (CP II-F) was used. A 0.40 water/cement ratio was utilized, and also a polycarboxylate superplasticizer additive to achieve the same workability from the control samples (without nanosilica addition). Cylindrical (2 cm diameter and 4 cm height) and prismatics ($2 \times 2 \times 10 \text{ cm}^3$) test samples were modeled, with 0 and 2.5 wt.% nanosilica addition, with and without superplasticizer.

It was noted, in calorimetric analysis, that the addition of nanosilica affects the cement hydration. By doing so, the hydration occurs faster, resulting in larger compressive strength, mainly at 3 days, achieving 28% in cylindrical samples, adding nanosilica in powder and after sonication in water and both with superplasticizer additive.

In BET analysis it was possible to note that the addition of nanosilica changed the porosity of cement pastes for pores smaller than 150 nm, but this change did not result in significant changes in compressive strength.

Observing the compressive and tensile strength it was possible to note that the sonication of the nanossilica in water has no effect on them.

Key-words: Portland Cement. Nanosilica. Addition Form. Superplasticizer additive. Strength Tests.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Construções históricas feitas com materiais com propriedades cimentantes	19
Figura 2 – Farol de Eddystone, Inglaterra	20
Figura 3 – Fornos em forma de garrafa utilizados por Aspdin	21
Figura 4 – Fábrica de cimento em Perus, SP	22
Figura 5 – Fluxograma simplificado do processo de fabricação do cimento	23
Figura 6 – Esquema simplificado de produção de cimento por via seca	24
Figura 7 – Perfil de liberação de calor de em CPII-F	27
Figura 8 – Distribuição dos poros nas pastas de cimento	31
Figura 9 – Nanossílica em forma de pó	40
Figura 10 – Nanossílica depois de sonicada em água	41
Figura 11 – Ilustração esquemática da cavitação induzida por ondas de ultrassom e das fraturas no aglomerado	44
Figura 12 – Ensaio de Kantro ou mini-slump	47
Figura 13 – Amostras para o Ensaio de Calorimetria	48
Figura 14 – Ensaio de Módulo de Elasticidade	49
Figura 15 – Ensaio de Resistência à Tração na Flexão	50
Figura 16 – Ensaio de resistência à compressão	51
Figura 17 – Ensaio de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos	52
Figura 18 – Fresagem dos corpos de prova cilíndricos	53
Figura 19 – Equipamento utilizado no ensaio BET	54
Figura 20 – Abertura do tronco de cone das pastas	57
Figura 21 – Fluxo de Calor das pastas de cimento	58
Figura 22 – Período de indução das pastas de cimento	59
Figura 23 – Detalhe dos períodos de indução e aceleração	59
Figura 24 – Coeficiente angular das retas que representam o período de aceleração	60
Figura 25 – Curvas de calor total liberado na hidratação das pastas de cimento	61
Figura 26 – Calor total liberado na hidratação das pastas de cimento	61
Figura 27 – Médias dos módulos de elasticidade dinâmico dos corpos de prova prismáticos	62
Figura 28 – Médias das resistências à tração na flexão	63
Figura 29 – Médias das resistências à compressão dos corpos de prova prismáticos	64
Figura 30 – Médias das resistências à compressão dos corpos de prova cilíndricos	65
Figura 31 – Distribuição dos diâmetros dos poros	67
Figura 32 – Distribuição dos diâmetros dos poros (50 - 150 nm)	68
Figura 33 – Distribuição dos poros menores que 20 nm	69
Figura 34 – Distribuição dos diâmetros dos poros (20 - 100 nm)	70

Figura 37 – Fluxo de Calor das pastas com adição de nanossílica não sonicada e com superplastificante	82
Figura 35 – Fluxo de Calor das pastas de referência	83
Figura 36 – Curvas de Calor Total Liberado na hidratação das pastas de referência	83
Figura 38 – Curvas de Calor Total Liberado na hidratação das pastas com adição de nanossílica não sonicada e com superplastificante	83
Figura 39 – Fluxo de Calor das pastas com adição de nanossílica sonicada e com superplastificante	84
Figura 40 – Curvas de Calor Total Liberado na hidratação das pastas com adição de nanossílica sonicada e com superplastificante	84
Figura 41 – Fluxo de Calor das pastas com adição de nanossílica não sonicada e sem superplastificante	85
Figura 42 – Curvas de Calor Total Liberado na hidratação das pastas com adição de nanossílica não sonicada e sem superplastificante	85
Figura 43 – Fluxo de Calor das pastas com adição de nanossílica sonicada e sem superplastificante	86
Figura 44 – Curvas de Calor Total Liberado na hidratação das pastas com adição de nanossílica sonicada e sem superplastificante	86

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características físicas do cimento	38
Tabela 2 – Características químicas do cimento	39
Tabela 3 – Características mecânicas do cimento	39
Tabela 4 – Características da nanossílica	40
Tabela 5 – Características do aditivo superplastificante	41
Tabela 6 – Composição das pastas de cimento	43
Tabela 7 – Passos para a preparação das pastas de cimento	46
Tabela 8 – Abertura da pasta de referência (<i>mini-slump</i>)	55
Tabela 9 – Abertura da pasta com 2,5% de nanossílica não sonicada e com superplastificante (<i>mini-slump</i>)	56
Tabela 10 – Abertura da pasta sonicada com 2,5% de nanossílica e com superplastificante (<i>mini-slump</i>)	56
Tabela 11 – Resultados obtidos com a análise BET	66
Tabela 12 – Módulo de Elasticidade Dinâmico aos 3 dias	87
Tabela 13 – Módulo de Elasticidade Dinâmico aos 7 dias	88
Tabela 14 – Módulo de Elasticidade Dinâmico aos 28 dias	89
Tabela 15 – Resistência à Tração na Flexão aos 3 dias	90
Tabela 16 – Resistência à Tração na Flexão aos 7 dias	91
Tabela 17 – Resistência à Tração na Flexão aos 28 dias	92
Tabela 18 – Resistência à Compressão dos corpos de prova prismáticos aos 3 dias .	93
Tabela 19 – Resistência à Compressão dos corpos de prova prismáticos aos 7 dias .	94
Tabela 20 – Resistência à Compressão dos corpos de prova prismáticos aos 28 dias .	95
Tabela 21 – Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 3 dias . .	96
Tabela 22 – Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 3 dias (continuação)	97
Tabela 23 – Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 7 dias . .	98
Tabela 24 – Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 7 dias (continuação)	99
Tabela 25 – Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias .	100
Tabela 26 – Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias (continuação)	101

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileiras de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing Materials
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
nS	Nanossílica
A	Al_2O_3
C	CaO
F	Fe_2O_3
H	H_2O
S	SiO_2
\bar{S}	SO_3
CH	Hidróxido de cálcio/Portlandita
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio/Portlandita
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CP II - F	Cimento Portland com adição de Fíler Calcário
C_2S	Silicato dicálcico
C_3S	Silicato tricálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
MPa	Mega Pascal
N	Newton

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Apresentação	18
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	O cimento	19
2.2	A história do cimento	19
2.2.1	O cimento Portland no Brasil	21
2.3	A fabricação de cimento	23
2.4	Composição química do cimento Portland	24
2.5	Tipos de cimento no Brasil	25
2.6	Hidratação do cimento Portland	26
2.6.1	Porosidade das pastas de cimento	29
2.7	Nanossílica em pastas de cimento	30
2.7.1	Dispersão da nanossílica	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Materiais utilizados	38
3.1.1	Cimento	38
3.1.2	Água	39
3.1.3	Nanossílica	39
3.1.4	Superplastificante	41
3.2	Preparação das pastas de cimento	42
3.2.1	Misturador mecânico	43
3.2.2	Sonicador	43
3.2.3	Fôrmas	44
3.3	Modo de preparo	45
3.4	Moldagem dos corpos de prova	46
3.5	Equipamentos e parâmetros de ensaio	47
3.5.1	Ensaio de Kantro ou <i>mini-slump</i>	47
3.5.2	Ensaio de Calorimetria por Condução	47
3.5.3	Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico	48
3.5.4	Ensaio de Resistência à Tração na Flexão	49
3.5.5	Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos	50

3.5.6	Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos	51
3.5.7	Ensaio BET	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	Definição do teor de superplastificante	55
4.2	Ensaio de Kantro ou <i>mini-slump</i>	57
4.3	Ensaio de Calorimetria por Condução	57
4.4	Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico	62
4.5	Ensaio de Resistência à Tração na Flexão	63
4.6	Ensaio de Resistência à Compressão dos corpos de prova prismáticos	64
4.7	Ensaio de Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos	65
4.8	Ensaio BET	66
5	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	71
	Conclusão	72
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICES	78
	APÊNDICE A – QUADRO-RESUMO COM ALGUNS RESULTADOS DA LITERATURA QUE MOSTRAM O EFEITO DA ADIÇÃO DE NANOSSÍLICA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	79
	APÊNDICE B – CALORIMETRIA	82
B.1	Pasta de referência	82
B.2	Pasta com adição de 2,5% de nanossílica não sonicada e com superplastificante	82
B.3	Pasta com adição de 2,5% de nanossílica sonicada e com superplastificante	84
B.4	Pasta com adição de 2,5% de nanossílica não sonicada e sem superplastificante	85
B.5	Pasta com adição de 2,5% de nanossílica sonicada e sem superplastificante	86
	APÊNDICE C – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	87
C.1	3 dias	87
C.2	7 dias	88

C.3	28 dias	89
	APÊNDICE D – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	90
D.1	3 dias	90
D.2	7 dias	91
D.3	28 dias	92
	APÊNDICE E – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS	93
E.1	3 dias	93
E.2	7 dias	94
E.3	28 dias	95
	APÊNDICE F – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS	96
F.1	3 dias	96
F.2	7 dias	98
F.3	28 dias	100

1 Introdução

1.1 Apresentação

Nos últimos anos, o uso de adições em materiais cimentícios vem sendo amplamente pesquisado. O propósito é melhorar as propriedades essenciais e o desempenho dos materiais bem como diminuir o impacto que a construção causa ao meio ambiente. Várias pesquisas, ([QING et al., 2007](#); [GAITERO; CAMPILLO; GUERRERO, 2008](#); [NAZARI; RIAHI, 2011](#)), citam como aspectos alterados pela nanossílica a melhora da resistência à compressão, maior durabilidade, menor porosidade e diminuição da trabalhabilidade.

A nanossílica, por apresentar uma área superficial bastante elevada, possui uma alta reatividade, o que promove reações instantâneas e gera produtos que auxiliam principalmente na resistência do material.

No entanto a literatura não é unânime sobre os efeitos positivos da adição desse material no desempenho de materiais cimentícios; por exemplo, alguns trabalhos, ([BERRA et al., 2012](#); [OLTULU; ŞAHIN, 2011](#)), relatam nenhuma ou pouco aumento de resistência mecânica. A qualidade da dispersão e o momento/forma de adição da nanossílica ao cimento parecem ser os fatores mandatórios no desempenho do material.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo é analisar a forma de adição de nanossílica bem como observar as mudanças provocadas em pastas de cimento pela mesma.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Além da adição somente da nanossílica, encontrar a quantidade ideal de superplastificante para obter a mesma trabalhabilidade da pasta de referência;
- Avaliar os efeitos causados pela nanossílica na hidratação do cimento, no módulo de elasticidade dinâmico, na resistência à tração na flexão, na resistência à compressão, na distribuição dos poros e na área superficial.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 O cimento

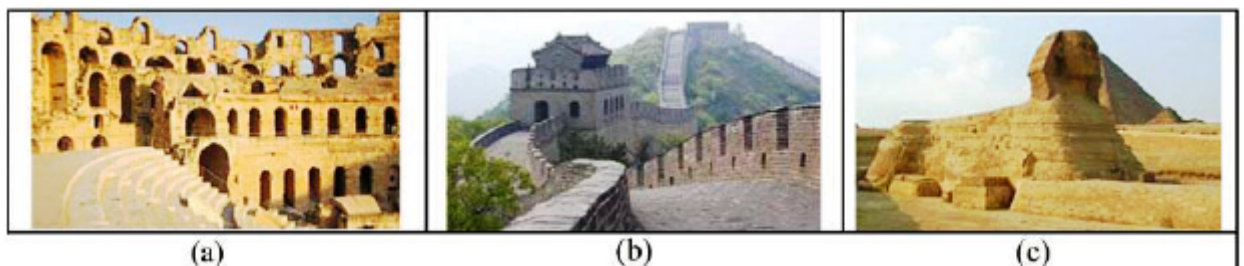
O Cimento Portland é um material pulverulento, composto por silicatos e aluminatos. Estes, ao serem misturados com a água, hidratam-se e posteriormente endurecem proporcionando elevada resistência mecânica ao material.

2.2 A história do cimento

A palavra cimento é originada do latim *Caementu* e significa união. Na antiga Roma, era uma espécie de pedra natural proveniente de rochedos. Uma das evidências mais antigas de sua existência está no Egito Antigo, onde usava-se uma mistura de gesso calcinado para unir as pedras que constituíam os monumentos daquela época, dentre os quais pode-se destacar as pirâmides.

As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão de Agripa e o Coliseu, foram construídas com uma mistura de terras vulcânicas que endureciam quando misturadas com água, sendo que as misturas dos romanos continham ainda areia, pedaços de telha e calcário calcinado. No entanto, a fórmula dessa mistura era um segredo tão importante que acabou desaparecendo junto com a queda do império. A [Figura 1](#) mostra exemplos de algumas construções históricas.

Figura 1: Construções históricas feitas com materiais com propriedades cimentantes



(a) Coliseu, Roma; (b) A Grande Muralha, China; (c) A Esfinge, Egito

Fonte: ([ABCP, 2009](#))

O cimento foi usado novamente apenas no ano de 1756, quando o inglês John Smeaton recebeu a tarefa de desenvolver uma mistura resistente à erosão causada pela água do mar. Para tal, ele utilizou uma cinza vulcânica vinda da Itália, conhecida como pozolana, obtida através da calcinação de calcários moles e argilosos. Conseguiu então

um produto de elevada resistência que veio a ser utilizados na construção do Farol de Eddystone ([Figura 2](#)).

Figura 2: Farol de Eddystone, Inglaterra



Fonte: ([Escola de Engenharia UFF, 2006](#))

No ano de 1796, o britânico James Parker patenteou um cimento com o nome de “Cimento Romano”, que era uma mistura obtida pela calcinação de calcário impuro contendo argila.

Em 1818, o engenheiro francês Louis José Vicat, realizou pesquisas e experimentos e obteve resultados semelhantes ao de Smeaton, através da mistura de materiais argilosos e calcários. Ele é considerado como o inventor do cimento artificial.

Contudo, foi só em 1824, que Joseph Aspdin patenteou uma mistura como “Cimento Portland”. Através da queima em conjunto de pedras calcárias e argilas, que moídas transformavam-se em um pó fino, ele percebeu que, adicionando água, quando essa mistura secava, tornava-se muito dura, como pedras, semelhantes às encontradas na ilha de Portland. Aspdin construiu fornos de alvenaria, com doze metros de altura, em forma de garrafa, que alcançavam elevadas temperaturas e imprimiam maior qualidade ao seu cimento ([Figura 3](#)).

Figura 3: Fornos em forma de garrafa utilizados por Aspdin



Fonte: (Cimento.org, 2008)

Percebendo o grande potencial do cimento Portland, vários países europeus começaram a se envolver no desenvolvimento do produto. A melhoria da sua qualidade deve-se, principalmente pelo aprimoramento dos fornos que aumentaram as técnicas de controle e a uniformidade do clínquer. A partir daí, até os dias de hoje houveram diversos avanços tecnológicos, mas o princípio de fabricação ainda é o mesmo: argila e calcário calcinados a altas temperaturas, adição de sulfato de cálcio para regular o tempo de pega e o uso, cada vez mais frequente, de adições.

A fabricação de cimento Portland de alto-forno começou em 1892, na Alemanha, o pozolânico em 1923, na Itália e o filerizado em 1976 na França. As diferentes composições desses cimentos bem como as diferentes propriedades obtidas com os mesmos proporcionaram a classificação dos tipos de cimento e as respectivas normas técnicas.

2.2.1 O cimento Portland no Brasil

No Brasil, as primeiras experiências relativas à fabricação de cimento aconteceram por volta de 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho instalou uma fábrica em sua fazenda, na cidade de Sorocaba - São Paulo. A usina lançou sua primeira produção em 1897 e operou durante sete anos.

Em 1890 houve a construção de uma fábrica na ilha Tiriti, na Paraíba, por ini-

ciativa do engenheiro Louis Felipe Alves da Nóbrega. No entanto, ela produziu apenas durante três meses, no ano de 1892, sendo motivo do fracasso a distância dos centros consumidores e a pequena escala de produção, que não conseguia competir com os cimentos importados na época.

Uma terceira iniciativa ocorreu no Espírito Santo em 1912, através de um programa estatal de industrialização. A fábrica, localizada na fazenda Monte Líbano, em Cachoeiro do Itapemirim, nunca chegou a funcionar regularmente, sendo remodelada e modernizada de 1924 a 1935. No entanto, funcionou apenas até 1958.

Depois de tentativas falhas, a implantação de uma fábrica em Perus, no Estado de São Paulo ([Figura 4](#)), pela Companhia Brasileira de Cimento Portland, é considerada como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento. Até então, o consumo de cimento dependia essencialmente da importação de países como a Alemanha, Bélgica, Dinamarca e França. Depois da implantação dessa fábrica, e diversas outras posteriores, a importação começou a diminuir cada vez mais até quase zero nos dias atuais.

Figura 4: Fábrica de cimento em Perus, SP



Fonte: ([Comércio de Perus, 2008](#))

Para o fortalecimento da indústria nacional de cimento, viu-se necessária a criação de uma associação técnica para dar suporte às atividades realizadas pelo setor. Assim, em 1936, as cinco fábricas existentes, fundaram a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

2.3 A fabricação de cimento

O cimento Portland é fabricado em instalações industriais complexas, adotadas de equipamentos apropriados. A Figura 5 mostra um fluxograma simplificado da fabricação.

Figura 5: Fluxograma simplificado do processo de fabricação do cimento



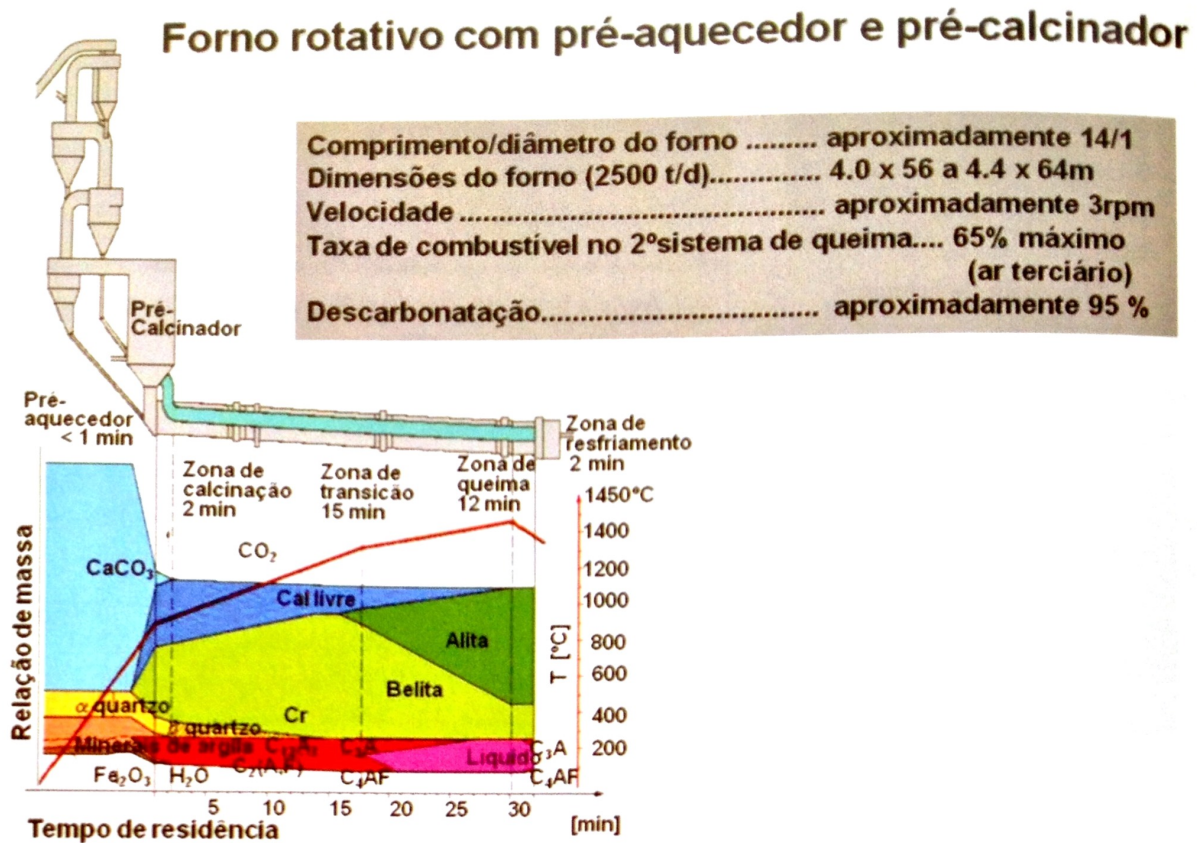
Fonte: (FAESA, 2009)

Inicialmente o calcário é retirado da mina através de explosivos e, posteriormente, passa por britadores. Para uma melhor qualidade do clínquer é adicionado argila (Al_2O_3) e minério de ferro (Fe_2O_3). O material é então moído, seco e homogeneizado. Posteriormente é encaminhado para um forno rotativo, onde será calcinado a cerca de $1450^\circ C$, e caminha por gravidade em direção à parte mais quente do equipamento. A sílica, alumina, ferro e cal reagem no interior do forno e formam o clínquer. A Figura 6 mostra um exemplo de produção mais utilizado no Brasil, que consiste na produção em fornos de via seca dotados de pré-calcinadores. Nela, podem ser observadas as fases dos principais compostos do clínquer que são formadas: alita, ou silicato tricálcico ($3CaO.SiO_3$, ou C_3S), belita ou silicato dicálcico ($2CaO.SiO_2$, ou C_2S) e as fases intersticiais entre os cristais: aluminato tricálcico e ferro aluminato tetracálcico, que são o $3CaO.Al_2O_3$ (C_3A) e o $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ (C_4AF).

O clínquer é então resfriado rapidamente a $80^\circ C$ e sua formação é acompanhada e controlada por meio de fotomicrografias. Depois de resfriado, o clínquer é moído até apresentar finura conveniente e outras matérias primas (como escória, pozzolanas, ou outra,

dependendo do tipo de cimento) e sulfato de cálcio (a fim de regular o tempo inicial de pega do cimento) são adicionados.

Figura 6: Esquema simplificado de produção de cimento por via seca



Fonte: (BATTAGIN; BATTAGIN, 2010)

2.4 Composição química do cimento Portland

Os compostos do cimento Portland, C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF , formam-se no interior do forno quando se eleva a temperatura de forma a transformar a mistura em um líquido pastoso que, ao resfriar-se, dá origem a substâncias cristalinas e, no caso do C_4AF , um material amorfo.

Nos fornos, a primeira reação que acontece é a combinação de óxido de ferro com alumina e cal, formando o C_4AF , até se esgotar o ferro. Depois, começa a formação do C_3A , através da combinação do Al_2O_3 excedente com CaO , até se esgotar a alumina. Por fim, se formarão os silicatos de cálcio, podendo ainda sobrar CaO livre em pequenas quantidades.

Os compostos formados apresentam como propriedade:

- C_4AF : tem pega rápida e baixa resistência mecânica. Porém, possui a vantagem de o Fe_2O_3 agir como fundente e também fixar parte da alumina, o que melhora o desempenho ao ataque de águas sulfatadas;
- C_3A : tem pega instantânea e desenvolve altíssimo calor de hidratação. Apresenta baixa resistência mecânica e ao ataque de águas sulfatadas. No entanto, a presença de alumina é muito importante no processo de fabricação do cimento, pois ela age como fundente, podendo ocorrer a formação do clínquer a temperaturas mais baixas;
- C_2S : tem pega lenta, desenvolve baixo calor de hidratação e apresenta baixa resistência mecânica até aos 28 dias, que aumenta então rapidamente;
- C_3S : é o composto essencial do cimento. É responsável pela resistência inicial, mas libera grande quantidade de calor durante a hidratação.

2.5 Tipos de cimento no Brasil

Atualmente existem oito tipos de cimento Portland no Brasil. Sendo eles:

- Cimento Portland comum:
 - Cimento Portland Comum (CP I): não possui qualquer adição além do gesso (retardador de pega);
 - Cimento Portland Comum com Adição (CP I-S): pode conter até 5% de escória, pozolana ou fíler calcário;
- Cimento Portland composto: gera calor em uma velocidade menor que o cimento Portland comum:
 - Cimento Portland com Adição de Pozolana (CP II-Z): a adição de pozolana varia de 6 a 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade;
 - Cimento Portland com Adição de Escória de Alto-Forno (CP II-E): a adição de escória granulada de alto forno pode variar entre 6 e 34% em massa, possuindo por principal característica o desprendimento moderadamente lento de calor;
 - Cimento Portland com Adição de Fíler Calcário (CP II-F): a adição de fíler deve estar entre 6 e 10% em massa;
- Cimento Portland de Alto-Forno (CP III): o conteúdo de escória deve estar entre 35 e 70% da massa total;
- Cimento Portland Pozolânico (CP IV): a quantidade de pozolana varia entre 15 e 50%;

- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI): a elevada resistência inicial é normalmente obtida através de uma maior finura do cimento;
- Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS): de acordo com a NBR 5737, cinco tipos de cimento podem ser resistentes a sulfatos. São eles: CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI, desde que atendam a alguns requisitos;
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC);
- Cimento Portland Branco (CPB): a cor branca é obtida através da utilização de matérias-primas com baixos teores de ferro e manganês, e caulim no lugar da argila.

2.6 Hidratação do cimento Portland

A hidratação do cimento Portland é um sistema complexo, pois o teor relativo das fases do clínquer, apesar de cada um ter uma reação diferente com água, influencia na evolução da hidratação como um todo. Nem todas as fases possuem a mesma reatividade e muitas variáveis estão envolvidas, dependendo das condições de clinquerização, de resfriamento e moagem. Dentre essas variáveis, pode-se destacar a dimensão do cristal, a morfologia, o teor de substituintes e a quantidade de defeitos devido o resfriamento.

A reação de hidratação é dinâmica e a composição dos produtos hidratados modifica-se no sentido de atingir a forma mais estável até que ela se complete (CINCOTTO, 2011).

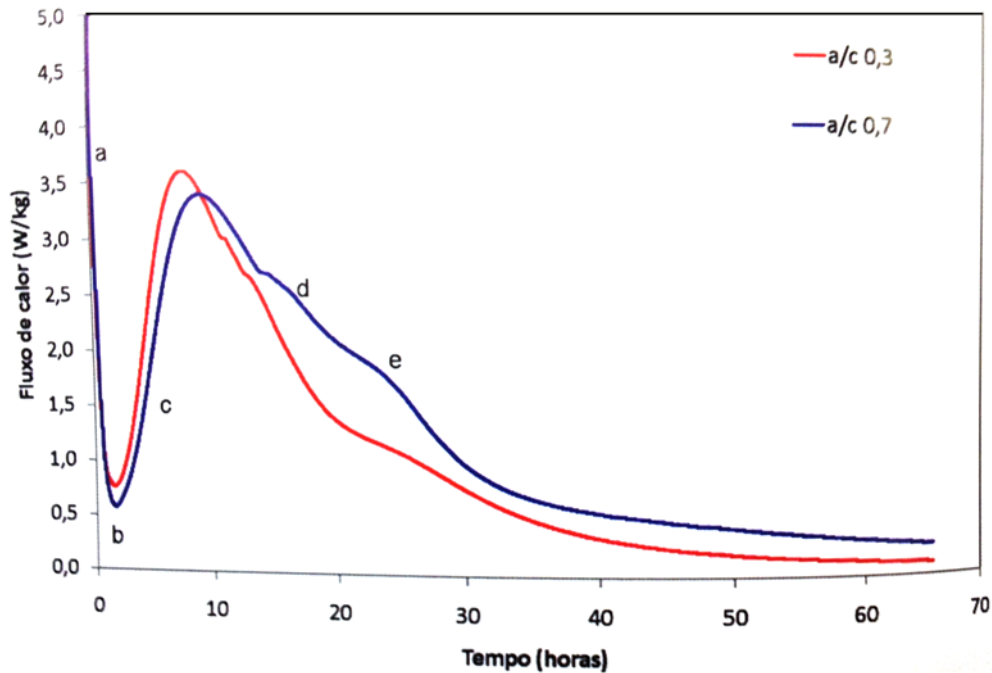
Durante o processo de hidratação ocorre a liberação de calor, bem como o preenchimento de vazios, uma vez que os produtos formados têm volume maior que os componentes que lhes deram origem (POWERS, 1958).

O calor total liberado na hidratação do cimento é a soma do calor liberado pelo percentual de cada fase do clínquer e de cada fração da granulometria, em virtude das diferentes áreas superficiais. O calor liberado por cada uma das fases, por hidratação completa, em KJ/g de cimento é: $C_3S=520$; $(\beta C)_2S=260$; $C_3A=910$; $C_4AF=420$. Na formação de etringita C_3A +gipsita+água=1140 (ODLER, ; COSTOYA et al., 2007).

Na Figura 7 pode-se observar um perfil de liberação de calor de um CP II-F determinado em calorímetro de condução. Observa-se: a) a liberação de calor devido à dissolução inicial do C_3S e C_3A , e neutralização de cargas superficiais; b) um pequeno período de indução; c) aceleração das reações por formação de C-S-H, etringita e portlandita; d) desaceleração e retomada da formação de etringita; e) liberação de calor pela transformação da etringita em monossulfoaluminato (Laboratório de Microestrutura - LME, 2011).

O pico de liberação de calor ocorre nos primeiros minutos, o principal de formação de C-S-H por volta de 10 horas, o de formação de etringita entre 15 e 30 horas, e o de monossulfoaluminato entre 20 e 30 horas (CINCOTTO, 2011).

Figura 7: Perfil de liberação de calor de em CII-F

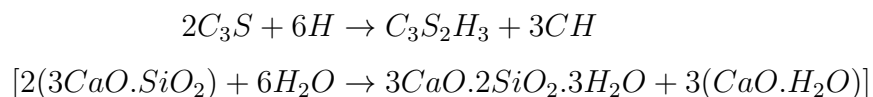


Fonte: (Laboratório de Microestrutura - LME, 2011)

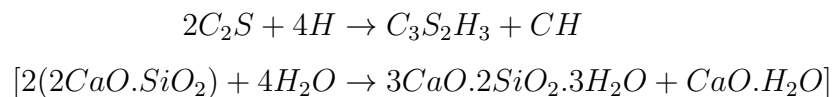
Uma vez que o cimento Portland é formado por uma mistura heterogênea de várias fases (C_3A , C_4AF , C_3S e C_2S), o processo de hidratação consiste das reações simultâneas desses compostos anidros com a água.

A hidratação do C_3S e βC_2S produz uma família de silicatos de cálcio hidratados, que são estruturalmente similares, mas variam muito na relação cálcio/sílica e no teor de água quimicamente combinada. Já que é a estrutura que determina as propriedades, as diferenças de composição entre os silicatos de cálcio hidratados tem pouco efeito sobre as suas características físicas. As reações são:

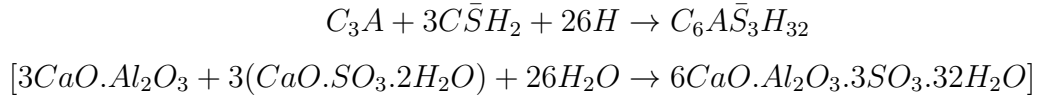
- C_3S :



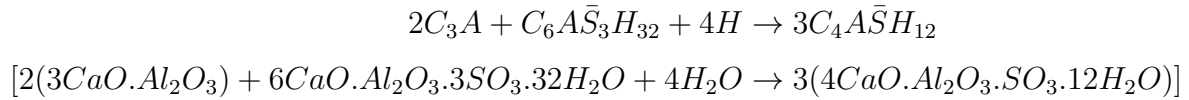
- βC_2S :



A reação do C_3A com água é imediata e hidratos cristalinos são rapidamente formados, liberando grande quantidade de calor. Devido à alta velocidade da reação do C_3A com a água, se faz necessária a adição do sulfato de cálcio para formar etringita, evitando assim a imediata formação de aluminatos de cálcio hidratados e, conseqüentemente, a pega instantânea da pasta de cimento. A reação do C_3A , na presença do sulfato de cálcio pode ser vista a seguir:



Quando a quantidade de íons sulfato é diminuída, um limite é atingido, onde não é mais possível a formação de etringita. O C_3A que não foi consumido reage com a etringita formada inicialmente, dando origem ao monossulfoaluminato de cálcio hidratado:



Os principais produtos da hidratação do cimento são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H, onde $C = CaO$, $S = SiO_2$ e $H = H_2O$), o hidróxido de cálcio (CH), os sulfoaluminatos como o tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt) ou etringita e os mono-sulfoaluminatos de cálcio (AFm). O C-S-H é o principal responsável pelas características mecânicas do produto final. Os sulfo-aluminatos também contribuem, só que em escala menor. A etringita existe em grande porção somente nas primeiras idades, quando se cristaliza na forma de agulhas. Durante o andamento da hidratação essas agulhas são transformadas em outros tipos de aluminatos como o AFm (TAYLOR, 1992). Já o CH é um dos produtos com menor resistência mecânica. No entanto, ele é responsável pela manutenção do pH elevado, situação favorável para o concreto armado.

No momento de contato com a água, o molhamento das partículas e a dissolução rápida dos compostos mais solúveis faz com que seja liberada uma grande quantidade de calor, porém a taxa de hidratação decresce rapidamente para valores muito baixos. O pH da solução aumenta o que intensifica a dissolução dos silicatos e aluminatos, que liberam íons $(Ca)^{2+}$ e $(OH)^-$. Também estão presentes na solução os íons K^+ , Na^+ e $(SO_4)^{2-}$ (JOLICOEUR; SIMARD, 1998).

Em contato com a água, a gipsita libera íons sulfato para a solução. O C_3A , dissolvido, em presença de quantidade suficiente de sulfato, forma etringita primária, que se precipita sobre os grãos anidros, formando pequenos cristais. Há assim, uma pequena redução na fluidez da pasta, mas ela continua trabalhável.

Posteriormente, dá-se início o período de indução ou de dormência, caracterizado pela conservação da trabalhabilidade, onde as reações de hidratação continuam ocorrendo,

porém de forma lenta. Para Jolicoeur e Simard (1998) esse período caracteriza-se pelas reações dos aluminatos, com o crescimento dos cristais de etringita e o espessamento da camada ¹ que envolve as partículas anidras de cimento. Segundo ainda os mesmos autores, se a concentração de $(SO_4)^{2-}$ for muito alta, ocorrerá grande re-cristalização de gipsita podendo gerar a falsa pega. E, se a concentração de $(SO_4)^{2-}$ for muito baixa poderá causar a pega instantânea.

Passado o período de indução, começa o período marcado pelo início da pega do cimento. A camada que envolvia os grãos rompe-se, permitindo a entrada da solução, onde mais íons são dissolvidos e precipitados na superfície da partícula de cimento, preenchendo os vazios. Assim, a camada ao redor das partículas começa a ficar cada vez mais espessa e há também uma restrição estérica cada vez maior ao crescimento dos produtos da hidratação, que começam a entrelaçarem-se. É nesse momento que a pasta começa a apresentar rigidez.

Segundo Taylor (1990) e Jolicoeur e Simard (1998), ocorre grande formação de C-S-H e CH provenientes do C_3S , o que diminui a concentração de Ca^{2+} . Os íons $(SO_4)^{2-}$ também são consumidos para a formação de etringita. Devido à cristalização dos aluminatos e formação de outros hidratos, uma grande quantidade de água é consumida, causando um repentino aumento da viscosidade.

Segundo a teoria de Michaelis a hidratação do cimento a partir do início da pega, ocorre por hidrólise seguida da reorganização do sólido. Os hidratos formados são mais densos e formam uma camada que se densifica com o tempo, dificultando cada vez mais a entrada da solução e ficando as reações mais lentas. A hidratação progride para o interior da partícula e pode levar anos para que ela se hidrate completamente. Ao mesmo tempo, ocorre uma densificação dos produtos formados nas primeiras idades, como elevação da resistência e diminuição da porosidade, caracterizando o período de endurecimento (TAYLOR, 1992).

2.6.1 Porosidade das pastas de cimento

Segundo Taylor (1997) a matriz da pasta de cimento é basicamente um material poroso composto por hidróxido de cálcio (portlandita), aluminatos e cimento não hidratado (clínquer) incorporado em um produto de hidratação com nanoestrutura amorfa, o silicato de cálcio hidratado. De acordo com Constantinides e Ulm (2007), esse gel é o produto de hidratação mais importante, não porque é o mais abundante (50-70% do volume), mas por causa das boas propriedades mecânicas que ele proporciona.

Apesar de o C-S-H ser pouco cristalino, existe uma organizada nanoestrutura, composta basicamente por cadeias de silicatos de tamanhos variados ligadas por camadas

¹ Acredita-se que essa camada seja composta por um tipo diferenciado de etringita e um tipo de C-S-H

de cálcio (RICHARDSON; GROVES, 1992; TAYLOR, 1986). É essa estrutura heterogênea, não só o gel (C-S-H) como também a pasta de cimento, que dá à pasta sua natureza porosa. Esses poros, de tamanho e origens diferentes, são preenchidos com uma solução extremamente básica ($\text{pH} > 12,5$) composta por água e minerais dissolvidos (GAITERO; CAMPILLO; GUERRERO, 2008). Dentre os tipos de poros, pode-se citar (MEHTA; MONTEIRO, 2005):

- Espaço entre camadas no C-S-H: o tamanho entre as camadas dentro do C-S-H varia de 5 a 25 Å, sendo este valor muito pequeno para ter efeito sobre a resistência mecânica e permeabilidade nas pastas de cimento hidratado.
- Poros Capilares: representam os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos das pastas de cimento hidratado, o espaço não ocupado pelo cimento ou os produtos de hidratação. O volume e tamanho destes poros é determinado como sendo a distância inicial entre as partículas de cimento anidro na pasta de cimento fresca e o grau de hidratação do cimento.

Em pastas bem hidratadas, com baixa relação água/cimento, os poros capilares podem variar de 10 a 50 nm; com altas relações água/cimento e em idades iniciais de hidratação esses poros podem variar de 3 a 5 μm . Gráficos típicos da distribuição dos poros em pastas de cimento podem ser observados na Figura 8. Poros capilares maiores que 50 nm, ou macroporos são, provavelmente, os que mais influenciam a resistência mecânica e a permeabilidade enquanto que os menores que 50 nm, ou microporos, influenciam na retração por secagem e na fluência.

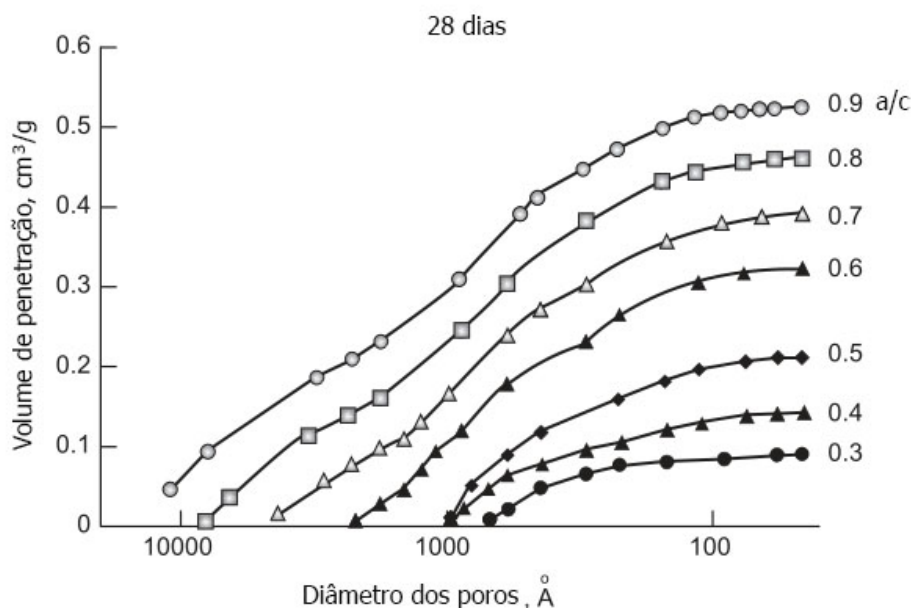
- Poros de ar: enquanto que os poros capilares são irregulares na forma, os poros de ar são geralmente esféricos. Uma pequena quantidade de ar, geralmente, fica presa na pasta de cimento durante a mistura. Estes, podem ter até 3 mm e são muito maiores que os poros capilares, sendo suscetíveis de afetar negativamente a resistência mecânica.

2.7 Nanossílica em pastas de cimento

Os conceitos de nanotecnologia e de nanociência se baseiam no estudo das propriedades e dos fenômenos que ocorrem em estruturas com dimensões entre 0,1 e 100 nm. No que diz respeito aos materiais cimentícios usados na construção civil, esses conceitos têm contribuído de forma inovadora através do conhecimento do comportamento molecular das reações de hidratação do cimento e da estrutura molecular dos seus principais produtos.

O papel crítico que a nanotecnologia pode ter em áreas que foram identificadas como limitantes do uso de materiais cimentícios pode ser ilustrado pela diminuição da

Figura 8: Distribuição dos poros nas pastas de cimento



Fonte: Traduzida e adaptada de [Mehta e Manmohan \(1980\)](#)

fluência, melhoria da coesão, aumento da resistência e da ductilidade, redução da fissuração nas primeiras idades, aumento da durabilidade e multifuncionalidade e aumento da velocidade de ganho de resistência ([GLEIZE, 2007](#)).

A adição de nano materiais permite o aumento da área de contato entre as superfícies e a reatividade, o que proporciona diversas vantagens em termos de reforço e eficiência ([GLEIZE, 2007](#)). No entanto, devido ao fato da alta relação superfície/volume, um dos principais desafios da adição de nano materiais é obter uma boa dispersão.

A adição de baixas quantidades de nano materiais representa uma melhoria geral na microestrutura e possibilita uma redução do consumo de cimento, pois aumenta a velocidade de hidratação do mesmo ([GLEIZE, 2011](#)). Existem diversas pesquisas mostrando as vantagens da adição de nano materiais à matriz cimentícia. Grande parte delas trata da adição da nanossílica.

A nanossílica é fabricada por processos controlados e pode se encontrar na forma de pó ou em suspensão, que pode ser coloidal ou em forma de gel. Os coloides são formas bem dispersas com tamanho médio de partícula entre 1 e 100 nm. Um hidrossol é formado quando um coloide está estavelmente disperso em um líquido, enquanto um gel é obtido quando, em uma mistura com líquido, os sólidos coloidais interagem formando uma rede tridimensional que pode ser elástica ou rígida, amorfa ou cristalina, com um líquido presente em todas as suas cavidades. Quando os géis são “fracos”, as ligações podem ser quebradas com intensa agitação, liquefazendo-se novamente, em um processo que pode ser reversível ([RANGEL, 2006](#)).

Além do aumento da área de contato entre as superfícies, a nanossílica apresenta reatividade pozolânica: ela reage com o hidróxido de cálcio (um dos produtos da hidratação do cimento Portland) formando C-S-H. Desta forma, aumentando a quantidade de C-S-H, obtém-se uma maior densificação da matriz, o que proporciona maior resistência mecânica, poros menores e maior durabilidade (SENFF et al., 2009).

Apesar do grande número de artigos que mostram a influência da nanossílica nas propriedades dos compósitos do cimento, os efeitos não estão bem caracterizados ainda, e algumas discrepâncias e diferenças em resultados são observadas. A medição da reatividade das nanossílicas, por exemplo, em várias pesquisas tem sido feita com altas relações água/cimento, o que pode não refletir precisamente reatividade pozolânica com baixas relações água/cimento.

Os resultados contraditórios também são encontrados nas propriedades mecânicas das misturas de cimento. Alguns resultados indicam melhora significativa nas propriedades mecânicas com a adição de nanossílica, enquanto outros mostram insignificante influência e até menores resistências à compressão comparados com amostras sem nenhuma adição. Algumas dessas diferenças podem ser explicadas pelos diferentes tipo e áreas superficiais das nanossílicas utilizadas, bem como a forma que elas se apresentam (em pó, suspensão coloidal, entre outros).

Segundo Shih, Chang e Hsiao (2006) tanto o efeito *filler* quanto a reação pozolânica fazem dos materiais siliciosos um dos principais materiais de alta performance. Segundo eles, pelo menos dois mecanismos podem ser deduzidos para explicar o aumento de resistência à compressão causado pela adição de nanossílica. O primeiro mecanismo é o efeito de empacotamento das partículas de nanossílica, que agem como um *filler*, preenchendo os espaços vazios dentro do esqueleto da pasta de cimento, que aumenta a densidade e a resistência à compressão. O segundo mecanismo é o efeito pozolânico que combina elementos de silício da nanossílica com elementos de cálcio do óxido e hidróxido de cálcio do cimento para adicionar a força de ligação e volume sólido, resultando em maior resistência à compressão. Normalmente, a maioria das reações pozolânicas entre hidróxido de cálcio e sílica amorfa ocorre devagar durante prolongados períodos de cura úmida. Já que as partículas de nanossílica são esféricas e possuem diâmetro cerca de 1000 vezes menor que partículas de sílica com $10\mu m$, resultando em uma altíssima área superficial, a nanossílica reage muito rapidamente com o hidróxido de cálcio para formar silicato de cálcio em um ambiente alcalino, como o fluido dos poros das pastas de cimento. Por essa razão, a contribuição por adição de nanossílica no aumento da resistência à compressão torna-se evidente 14 dias após a hidratação do cimento.

Madani, Bagheri e Parhizkar (2012) concluíram que nanossílicas com maiores áreas superficiais têm mais rápida reatividade pozolânica no primeiro dia. No entanto, em posteriores idades, insignificantes diferenças foram obtidas. Durante as primeiras horas da

hidratação do cimento, em pastas de cimento, a superfície dos aglomerados de sílica está relativamente limpa, conseqüentemente, a taxa de reatividade pozolânica é controlada pela taxa de dissolução da sílica no fluido dos poros. A taxa de dissolução da sílica depende da área superficial da nanossílica; conseqüentemente a área superficial é um significativo fator na taxa de reatividade pozolânica nas primeiras idades. Com o progresso da hidratação, uma camada de produtos hidratados, que fica espessa conforme o passar do tempo, precipita na superfície dos aglomerados de sílica. Essa camada desacelera a taxa de dissolução da sílica no fluido dos poros. Assim, a taxa de reatividade pozolânica é controlada pela taxa de difusão através dos produtos hidratados e conseqüentemente, a área superficial das nanossílica se torna menos importante depois do primeiro dia.

Madani, Bagheri e Parhizkar (2012) ainda concluíram que no primeiro dia, as pastas de cimento contendo nanossílica tinham levemente um maior grau de hidratação quando comparadas com as pastas sem nenhuma adição. Em 3 dias, as pastas de cimento contendo nanossílica tinham graus de hidratação similares aos das pastas sem nenhuma adição e com o progresso da hidratação, a partir dos 7 dias, o uso da nanossílica levou à uma redução do grau de hidratação. O maior grau de hidratação no primeiro dia em pastas de cimento contendo nanossílica é uma clara evidência da aceleração da hidratação que a nanossílica provoca. Existem dois mecanismos que podem explicar a aceleração do grau de hidratação do cimento causada pela adição de nanossílica. Primeiro, a nanossílica encurta o período de indução das pastas de cimento através da redução da concentração dos íons de cálcio por causa da sua rápida reatividade pozolânica (BEEDLE; GROVES; RODGER, 1989; KORPA; KOWALD; TRETTIN, 2008; STEIN; STEVELS, 1964) e segundo, partículas de nanossílica fornecem grandes quantidades de superfície silicosa para as primeiras precipitações dos produtos hidratados do cimento (WU; YOUNG, 1984; KORPA; KOWALD; TRETTIN, 2008).

No que diz respeito ao primeiro mecanismo, nos primeiros minutos de contato entre o cimento e a água, uma metaestável forma de C-S-H, que é relativamente pouco permeável, forma uma barreira física de difusão na superfície dos grãos de cimento. Essa camada ² parece ser responsável pelo período de indução do cimento e a conversão da fase “impermeável” de C-S-H primário em uma forma mais permeável de C-S-H causa o final do período de indução (BEEDLE; GROVES; RODGER, 1989; GARTNER et al., 2002). Através do aumento da concentração de íons de silicatos (BEEDLE; GROVES; RODGER, 1989) e da redução de íons de cálcio por causa da rápida reatividade pozolânica (BEEDLE; GROVES; RODGER, 1989; KORPA; KOWALD; TRETTIN, 2008; STEIN; STEVELS, 1964) a adição da nanossílica pode acelerar a transição do produto metaestável para a forma estável, conseqüentemente ela pode diminuir o começo e o fim da pega de pastas de cimento. É notável que nanossílicas com altas áreas superficiais tenham uma maior taxa

² Outros autores consideram que, além de C-S-H, também tenha um tipo etringita nesta camada

de reatividade pozolânica, tendo assim maior influencia no início e no final da pega.

No que diz respeito ao segundo mecanismo, se for assumido que as partículas de nanossílica estão em forma de aglomerados no fluido dos poros, as superfícies de tais aglomerados proporcionam locais para a precipitação dos primeiros produtos da hidratação, resultando na aceleração da hidratação inicial do cimento - é o fenômeno de “nucleação heterogênea”. Se tratando da acessibilidade ao interior dos aglomerados de nanossílica para precipitação dos produtos hidratados, deve ser notado que embora o acesso inicial possa estar disponível, com o processo de hidratação uma camada é formada na superfície, limitando gradualmente o acesso ao interior desses aglomerados. Durante a aglomeração das partículas de nanossílica, uma considerável quantidade de água é absorvida nos poros dos aglomerados, resultando em redução da água disponível para hidratação do cimento e conseqüentemente menor grau de hidratação do cimento a partir dos 7 dias. [Madani, Bagheri e Parhizkar \(2012\)](#) acreditam que o aprisionamento de parte da água de mistura nos aglomerados de nanossílica formados, fazendo com que menos água esteja disponível para a hidratação do cimento, também é responsável pela diminuição da fluidez.

A nanossílica na forma de hidrossol, também reduziu o tempo de início de pega nas pastas de cimento. Quanto maior a área superficial e maior a quantidade de nanossílica utilizada (utilizaram de 0 a 7,5% em relação à massa de cimento), maior era essa redução. O menor tempo para o início de pega é devido ao encurtamento do período de indução das pastas através da aceleração da conversão da primeira fase de C-S-H, que cerca as partículas de cimento, para a forma estável, por meio da rápida atividade pozolânica.

[Berra et al. \(2012\)](#), utilizando nanossílica de 10 nm em suspensão e contendo hidróxido de sódio como estabilizante, não observaram melhora significativa da resistência à compressão. Segundo os autores para avaliar corretamente o desempenho das pastas de cimento com nanossílica e compará-las com as pastas de referências, essas deveriam apresentar a mesma relação água/cimento e a mesma trabalhabilidade. Como isso não é possível sem o uso de aditivo, devido a grande demanda de água que a nanossílica apresenta, os autores trabalharam de três modos diferentes: 1) mantendo a relação água/cimento (0,50), mas diferentes trabalhabilidades; 2) com a mesma trabalhabilidade, mas com relações água/cimento diferentes e 3) com a mesma trabalhabilidade e a mesma relação a/c, com o uso de superplastificante - baseado principalmente em um tipo poliacrílico de superplastificante. Os resultados mostraram que quando mantida a mesma relação água/cimento, porém com trabalhabilidades diferentes não há melhora significativa na resistência à compressão. Devido à quantidade relativamente alta de água, se observou altas porosidades e baixas resistências à compressão em todas as pastas (com e sem nanossílica). Quando foi mantida a trabalhabilidade, com diferentes relações água/cimento, adicionando uma quantidade de 3,8% de nanossílica em relação à massa de cimento, a resistência caiu quase 80% aos 60 dias. Isso se deve ao fato de que a relação água/cimento

necessária foi de 0,75 enquanto nas pastas de referência era de 0,36. E quando era mantida a trabalhabilidade e mesma relação a/c, não observou grandes mudanças na resistência (17,4% aos 28 dias e 7,6% aos 60 dias). No entanto esse ganho de resistência foi atribuído pelos autores, em grande parte, pelo fato de o superplastificante usado ser conhecido por aumentar a resistência à compressão e um acelerador de endurecimento do cimento.

A quantidade de nanossílica a ser utilizada também é bastante discutida. Nos casos em que a adição apresentou melhoras na resistência à compressão, alguns pesquisadores (PORRO et al., 2005; THUADAIJ; NUNTIYA, 2008; GAITERO; CAMPILLO; GUERRERO, 2008) relataram um progressivo aumento de resistência com o aumento da adição de nanossílica de 0,2 a 10-12% em relação à massa de cimento. Em contraste, Shih, Chang e Hsiao (2006) encontraram um máximo de ganho de resistência (43%) adicionando 0,6% de nanossílica em relação ao peso de cimento. Esse ganho de resistência caiu para 19% quando a quantidade de nanossílica era aumentada de 0,6 para 0,8% em relação à massa de cimento.

Segundo Qing et al. (2007) a substituição do cimento em 5% (nesse caso foi retirada parte do cimento), em massa, por nanossílica, apresentou uma melhora de até 41% aos 3 dias de cura. Os autores também concluíram que a substituição do cimento por um material de alta área superficial, como a nanossílica, faz com que aumente a área molhável e a quantidade de água absorvida, o que faz a pasta de cimento ficar mais espessa. Concluíram ainda que a nanossílica consome cristais de CH na interface pasta-agregado, o que pode melhorar a estrutura desta interface e acelerar o processo de hidratação do cimento (acelera a hidratação do C_3S).

Gaitero, Campillo e Guerrero (2008) realizaram um estudo analisando propriedades das pastas de cimento antes e depois de estarem em uma solução agressiva (com o intuito de analisar a lixiviação de cálcio). Até aos 28 dias eles eram curados em água saturada em cal, com o intuito de evitar perdas prematuras de cálcio, e depois eram colocados na solução agressiva. Foram utilizados 3 tipos comerciais diferentes de nanossílica coloidal e um tipo de nanossílica em pó, adicionando 6% em relação à massa de cimento. Como resultado, se observou que após 7 dias o aumento de resistência à compressão era significativo, e crescia para 20-30% aos 28 dias. Contudo, essa diferença se tornava ainda maior quando a degradação começava, porque, enquanto aos 7 dias a referência e as amostras com adição de nanossílica em pó diminuíam suas resistências em 75% e 65% respectivamente, no caso das amostras contendo nanossílica em dispersão coloidal essa redução era de apenas 10%. Eles concluíram que a adição de nanossílica reduz a porosidade, transforma portlandita (CH) em C-S-H através de reação pozolânica e modifica a estrutura interna do C-S-H aumentando o tamanho médio das cadeias de silicato.

Já segundo Nazari e Riahi (2011) há uma perda de resistência substituindo cimento por nanossílica em mais de 4%. Isso pode ser pelo fato que a quantidade de nanossílica

presente na mistura é maior que a quantidade necessária para combinar com hidróxido de cálcio liberado na hidratação levando à lixiviação do excesso de sílica e causando uma deficiência na resistência mecânica uma vez que ela substitui o cimento, mas não contribui para a resistência. Também, pode ser por causa dos defeitos causados na dispersão das nanopartículas que causam zonas fracas.

Com a adição de 1, 2, 3 e 4% em relação ao peso de cimento [Nazari e Riahi \(2011\)](#) observaram uma melhora progressiva da resistência à compressão, chegando a 100% aos 7 dias e diminuindo para 74% aos 28 dias. A maior resistência à compressão em amostras contendo nanossílica é devida ao rápido consumo de $Ca(OH)_2$ cristalino, que é rapidamente formado durante a hidratação do cimento Portland principalmente em idades iniciais, como resultado da alta reatividade da nanossílica. Como consequência, a hidratação do cimento é acelerada e são formados produtos com maiores volumes. Também, nanopartículas de sílica recuperam a densidade de empacotamento das partículas do cimento misturado, fazendo com que haja um menor volume de poros grandes na pasta de cimento.

No que diz respeito à porosidade das pastas de cimento, [Nazari e Riahi \(2011\)](#) concluíram que aumentando a quantidade de nanossílica em até 4% em massa, o volume total de poros diminui e o diâmetro dos poros é reduzido, ficando na faixa de 20-50 nm. Também, a quantidade de poros é diminuída, o que mostra que a densidade é aumentada e a estrutura dos poros é melhorada. A nanossílica pode acelerar a formação de hidratos do cimento e por isso as amostras necessitam de mais água para produzir esses produtos. Portanto, após 2 dias de cura, o consumo de água em amostras contendo nanossílica é maior que naquelas com nenhuma adição. Aos 7 e 28 dias de cura, a estrutura dos poros em amostras contendo nanossílica é melhor e a permeabilidade é menor do que as sem nenhuma adição.

O mecanismo da nanossílica melhorando a estrutura dos poros pode ser interpretado da seguinte maneira ([KONDO; UEDA, 1968](#)): admita que nanopartículas sejam uniformemente dispersas e cada partícula está contida em um cubo padrão, então a distância entre nanopartículas pode ser determinada. Depois que a hidratação começa, produtos hidratados difundem e envolvem nanopartículas como um núcleo ([LEGRAND; WIRQUIN, 1994](#)). Se a quantidade de nanopartículas e a distância entre elas são apropriadas, a cristalização será controlada para ser um estado adequado através da restrição do crescimento dos cristais de hidróxido de cálcio pelas nanopartículas. Além disso, as nanopartículas localizadas nas pastas de cimento como núcleo podem promover mais hidratação do cimento devido à alta reatividade. Isso faz a matriz do cimento mais homogênea e compacta ([LEGRAND; WIRQUIN, 1994](#)).

Ainda na pesquisa de [Nazari e Riahi \(2011\)](#), foi observado que com o aumento da quantidade de nanossílica em mais de 4% a melhora na estrutura dos poros é diminuída.

Isso pode ser atribuído ao fato de que a distância entre as nanopartículas diminui com o aumento da sua quantidade, e cristais de hidróxido de cálcio não podem crescer o suficiente devido à uma limitação de espaço e à quantidade de cristais diminuída, o que leva à uma pequena taxa de transformação de cristais em gel de C-S-H e à maiores deformações e encolhimentos da matriz de cimento (LI; ZHANG; OU, 2007). Foi observado também que nanopartículas podem agir, além de um ativador para acelerar a hidratação do cimento por causa da sua alta reatividade, como um núcleo na pasta de cimento que faz com que o tamanho dos cristais de hidróxido de cálcio fique menor.

No Apêndice A encontra-se um quadro-resumo com alguns resultados da literatura mostrando efeitos da adição de nanossílica em materiais cimentícios.

2.7.1 Dispersão da nanossílica

Segundo Li et al. (2004), quando uma pequena quantidade de nanossílica é uniformemente dispersa na pasta de cimento, os produtos hidratados do cimento se depositarão nas partículas de nanossílica devido à grande energia na superfície durante a hidratação e ao crescimento para formar aglomerados com as partículas de nanossílica como núcleo. As partículas de nanossílicas encontradas na pasta de cimento irão promover ainda uma aceleração da hidratação do cimento devido à sua alta reatividade.

No entanto, quando partículas de nanossílica não são bem dispersas, no caso de quando há concentração, os aglomerados de nanossílica serão zonas fracas. Consequentemente, a estrutura homogênea formada de produtos hidratados pode não ser formada e então, baixa resistência à compressão é esperada.

Berra et al. (2012) concluíram que a trabalhabilidade das pastas de cimento ensaiadas se apresentou menor do que a esperada quando adicionada a nanossílica (10 nm) em solução, o que evidencia a formação de géis com significativa capacidade de retenção de água. Essa diminuição da trabalhabilidade foi evitada adicionando superplastificante. Ainda segundo o mesmo autor misturar o superplastificante posteriormente à mistura do cimento, da água e da nanossílica, usando um apropriado misturador para quebrar os géis formados, mostrou ser o melhor procedimento para a mistura dos materiais, sem prejudicar a reatividade da nanossílica.

3 Materiais e métodos

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Cimento

Neste trabalho foi utilizado cimento Portland com adição de fíler calcário (CPII-F), que contém até 10% de finos calcários, fabricado pela Itambé, ensacado em 15 de dezembro de 2014, segundo as especificações da norma brasileira [ABNT \(1991\)](#). Este cimento foi escolhido por sua adição é inerte durante a hidratação. A seguir, nas tabelas [1](#), [2](#) e [3](#), encontram-se as características físicas, químicas e mecânicas do cimento, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 1: Características físicas do cimento

Ensaio Físico	
Expansibilidade a Quente (mm)	0,00
Início de pega (h:min)	3:10
Fim de pega (h:min)	4:00
Consistência normal (%)	28,0
Área específica (cm^2/g)	3.550
# 200 (%)	1,30
# 325 (%)	10,50

Fonte: ([CIMENTO ITAMBÉ, 2014](#))

Tabela 2: Características químicas do cimento

Composto	Teor (%)
Al_2O_3	4,40
SiO_2	18,42
Fe_2O_3	2,64
CaO	60,25
MgO	4,51
SO_3	2,84
Perda ao fogo	5,07
CaO livre	0,67
Resíduo Insolúvel	1,77
Equivalente Alcalino	0,62

Fonte: (CIMENTO ITAMBÉ, 2014)

Tabela 3: Características mecânicas do cimento

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)
1	14,7
3	29,5
7	36,2
28	42,1

Fonte: (CIMENTO ITAMBÉ, 2014)

3.1.2 Água

Para a confecção das pastas de cimento, foi utilizado como solvente água deionizada, para tentar evitar que íons pudessem causar variações nos ensaios. A relação água/cimento usada foi de 0,40, que se mostrou a mais adequada para o adensamento da pasta de referência nas fôrmas.

3.1.3 Nanossílica

A nanossílica adicionada apresenta tamanho médio de 15 nm, pureza maior que 99% e área superficial de $640m^2/g$, outras características estão ilustradas na Tabela 4. Esta foi adicionada na forma de pó e sonicada em água.

Nas Figuras 9 e 10 pode-se observar a nanossílica em pó e depois de sonicação em água.

Tabela 4: Características da nanossílica

Propriedade	
Cor	Branca
Forma	Pó
Odor	Não contém
Ponto de fusão/Intervalo de fusão	1610 - 1728 °C
Ponto de ebulição/Intervalo de ebulição	2230 °C
Densidade a 20 °C	2,17 – 2,66 g/cm ³
Solubilidade em água	Insolúvel

Fonte: (N&AM, 2008)

Figura 9: Nanossílica em forma de pó



Fonte: AUTORA

Figura 10: Nanossílica depois de sonicada em água



Fonte: AUTORA

3.1.4 Superplastificante

A fim de obter uma mesma trabalhabilidade quando adicionada a nanossílica, se utilizará como aditivo superplastificante o Tec Flow 8000, da marca Grace, apresentando-se na forma líquida. As características do material estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Características do aditivo superplastificante

Produto	TEC-FLOW 8000
Nome químico	Policarboxilato modificado
Estado físico	Líquido
Cor	Amarelo turvo
Odor	Odor característico
Peso específico	$1,10 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$
Voláteis (% em peso)	51,0 %
pH (produto puro)	$5,5 \pm 1,0$
Solubilidade em água	Totalmente solúvel

Fonte: (RHEOSET, 2010)

O efeito dispersante sobre as partículas de cimento possibilita a fabricação com

baixas relações água/cimento, com elevada plasticidade e elevado tempo de manutenção da mesma, obtendo dessa maneira ganhos significativos das resistências mecânicas iniciais e finais.

O superplastificante é constituído por polímeros de éter carboxílico com largas cadeias laterais. No começo do processo de mistura inicia-se o mecanismo de dispersão eletrostática. Em seguida, as cadeias laterais, enxertadas à estrutura polimérica principal, geram um efeito dispersante adicional e mais estável nas partículas de cimento, efeito esse chamado de repulsão estérica.

Como benefícios do uso do superplastificante o fabricante cita:

- Redução acentuada da água de amassamento para uma mesma consistência;
- Aumento da fluidez com manutenção desta por um tempo prolongado;
- Elevadas resistências iniciais e finais;
- Não altera o tempo de pega do cimento;
- Melhora da aderência;
- Aumento da coesão;
- Redução da permeabilidade;
- Redução da retração e fissuras de origem plástica;
- Aumento da durabilidade.

3.2 Preparação das pastas de cimento

Foram preparadas pastas de cimento Portland para avaliar se a forma de adição de nanossílica tem influência sobre as mesmas. Foram moldados corpos de prova com 2,5% de adição e sem nanossílica, com e sem superplastificante. O teor de 2,5% foi escolhido com base nos artigos lidos, a maioria dos pesquisadores conseguia bons resultados com teores entre 1 e 6%, então optou-se por um meio termo, levando em consideração também a quantidade de material disponível no laboratório.

Para fins de comparação também foram moldados corpos de prova com pastas preparadas somente com água e cimento. A composição das pastas está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Composição das pastas de cimento

Lote	Cimento (g)	Água (g)	Nanossílica (g)	Superplastificante (g)
Referência	850	340	-	-
Não Sonicada sp	850	340	21,25	0,765
Não Sonicada	850	340	21,25	-
Sonicada sp	850	340	21,25	0,850
Sonicada	850	340	21,25	-

Fonte: AUTORA

3.2.1 Misturador mecânico

As pastas foram misturadas em misturador mecânico, fornecido pela Tademix Ind. e Com. Ltda, modelo ML-03. O motor tem 0,75 HP, capacidade de até 2 litros, rotação de até 1760 rpm, e hélices tipo *cawles* de fluxo axial e 6 cm de diâmetro.

3.2.2 Sonicador

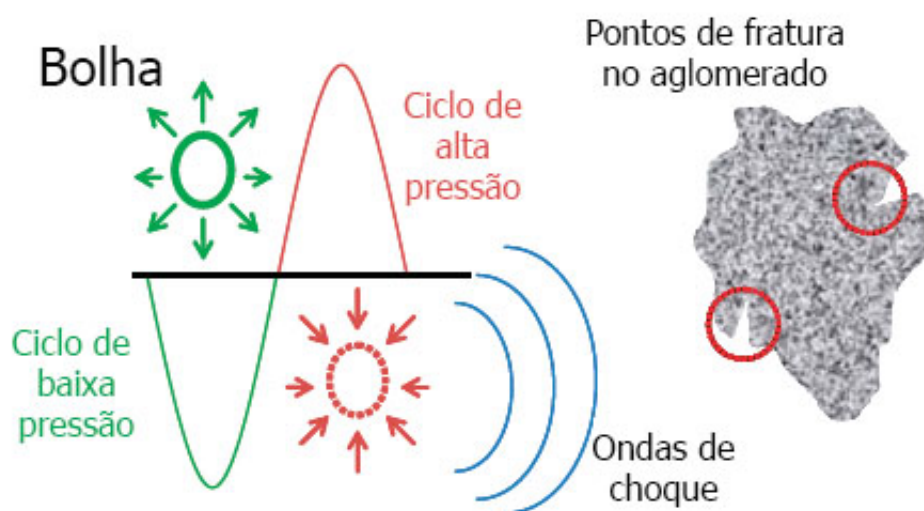
Materiais em pó consistem de partículas que estão ligadas em estruturas macroscópicas por fracas forças de van der Waals e fortes ligações químicas, incluindo a fusão de partículas (ZACHARIAH; CARRIER, 1999; MANDZY; GRULKE; DRUFFEL, 2005; JIANG; OBERDÖRSTER; BISWAS, 2009). Geralmente, esses materiais em pó contêm agregados em escala micro e submicrométrica, que por sua vez se mantêm agrupados através de força física, constituindo aglomerados maiores. Para pós que consistem de partículas e agregados na escala nanométrica e, portanto, tendo significativa área superficial de contato por unidade de volume, a denominada “fraca” força de van der Waals pode ser extremamente grande, requerendo o uso de técnicas como a sonicação para quebrar efetivamente os aglomerados (TAUROZZI; HACKLEY; WIESNER, 2011).

Sonicação refere-se à aplicação de energia sonora em frequências inaudíveis ao ouvido humano (maior que 20 kHz), com o objetivo de facilitar a quebra de aglomerados de partículas através de um processo conhecido como cavitação. A quebra por ultrassom é energeticamente mais eficiente do que outras técnicas convencionais de dispersão e pode alcançar um alto grau de fragmentação do pó, à energia específica constante (PARK; SMITH; THOMA, 1993; HIELSCHER, 2005; MANDZY; GRULKE; DRUFFEL, 2005).

Durante o processo de quebra por ultrassom, ondas sonoras se propagam através do meio líquido em ciclos alternados de alta e baixa pressão, a frequências, tipicamente na gama de 20-40 kHz. Durante o ciclo de baixa pressão (rarefação), bolhas microscópicas de vapor são formadas, em um processo chamado de cavitação (Figura 11).

Em seguida, as bolhas entram em colapso durante o ciclo de alta pressão (com-

Figura 11: Ilustração esquemática da cavitação induzida por ondas de ultrassom e das fraturas no aglomerado



Fonte: Traduzido e adaptado de ([TAUROZZI; HACKLEY; WIESNER, 2011](#))

pressão) produzindo uma onda de choque localizada que libera uma grande quantidade de energia térmica e mecânica.

A energia elétrica é transformada em energia vibracional, através de um transdutor piezoelétrico que muda as dimensões dos aglomerados em resposta a um campo elétrico de corrente alternada.

O sonicador utilizado foi o modelo Vibra-Cell 750 Watts com processador ultrassônico – Serie VCX, frequência de 20 kHz, que ativa e acelera as reações químicas da mistura. A energia utilizada foi de 50000 Joules, amplitude de onda de 50%. O ciclo era de 20 segundos sonicando a solução e 20 segundos parado, por um tempo total de 12 minutos. Tais parâmetros basearam-se em trabalhos realizados anteriormente no Nanotec ([AZEVEDO, 2015](#); [GOLDONI, 2014](#)).

3.2.3 Fôrmas

As fôrmas para a confecção dos corpos de prova utilizados para os testes de resistência à compressão eram cilíndricas, de *nylon*, com 20 mm de diâmetro e 50 mm de altura - para permitir até 10 mm de fresa.

As fôrmas para a confecção dos corpos de prova utilizados para os testes de resistência à flexão e módulo de elasticidade eram também de *nylon*, com 100x20x20 mm³. Sempre era aplicado desmoldante para evitar que os corpos de prova ficassem aderidos às fôrmas.

3.3 Modo de preparo

A mistura das pastas foi realizada em sala climatizada com temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

As pastas sem nenhuma adição eram misturadas, inicialmente, de forma manual durante 2 minutos. Depois eram misturadas no misturador mecânico durante 3 minutos contínuos em recipiente metálico. Esta homogeneização inicial era importante para garantir a correta mistura pelo misturador mecânico, evitando o acúmulo de material sólido no fundo do recipiente.

Quando era adicionada nanossílica em pó, a água era colocada em um recipiente metálico e a adição de cimento era realizada em 3 etapas: em cada etapa um terço do cimento era misturado durante 30 segundos. Feito isso, toda a pasta era misturada por 30 segundos no misturador mecânico. Em seguida era adicionada a nanossílica e misturava-se por mais 30 segundos manualmente. Então, misturava-se por 1 minuto no misturador mecânico. Por último, as pastas eram misturadas mecanicamente por mais um minuto e meio sendo o superplastificante adicionado nesta etapa quando necessário, diluído em 10% da água separado inicialmente.

Para a sonicação da nanossílica, esta foi misturada na água necessária para uma relação a/c de 0,40. Como o processo faz com que a temperatura da mistura aumente, esta foi resfriada até atingir a temperatura de cerca de 24°C . Posteriormente, era adicionada 1/3 da quantidade de cimento e misturados manualmente durante 30 segundos. A etapa se repetia para o segundo terço. Por fim, era adicionado o último terço de cimento e misturado manualmente por 1 minuto. Então, misturava-se mecanicamente por 1 minuto e meio. Finalmente, as pastas eram misturadas mecanicamente por mais um minuto e meio sendo o superplastificante adicionado nesta etapa quando necessário, diluído em 10% da água separado inicialmente.

Na Tabela 7 pode ser visto um resumo do modo de preparo.

Tabela 7: Passos para a preparação das pastas de cimento

Passos	Referência	Não sonicada sp	Sonicada sp	Não sonicada	Sonicada
Separação de 10% da água		1	1		
Colocação da água no recipiente	1	2	2	1	1
Adição da nS em pó na água e sonicação			3		2
Adição de 1/3 do cimento	2	3	4	2	3
Mistura manual	3 (30 s)	4 (30 s)	5 (30 s)	3 (30 s)	4 (30 s)
Adição de 1/3 do cimento	4	5	6	4	5
Mistura manual	5 (30 s)	6 (30 s)	7 (30 s)	5 (30 s)	6 (30 s)
Adição de 1/3 do cimento	6	7	8	6	7
Mistura manual	7 (60 s)	8 (30 s)	9 (60 s)	7 (30 s)	8 (60 s)
Mistura mecânica	8 (180 s)	9 (30 s)	10 (90 s)	8 (30 s)	9 (180 s)
Adição da nS em pó na pasta		10		9	
Mistura manual		11 (30 s)		10 (30 s)	
Mistura mecânica		12 (60 s)		11 (150 s)	
Adição do superplastificante		13	11		
Mistura mecânica		14 (90 s)	12 (90 s)		

Fonte: AUTORA

3.4 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos, os moldes foram preenchidos até a metade, vibrados manualmente para a saída do ar, preenchidos até em cima e vibrados manualmente de novo.

Para a moldagem dos corpos de prova prismáticos, os moldes eram preenchidos em uma só vez e então vibrados manualmente para permitir a saída do ar.

Após 24 horas os corpos de prova eram desmoldados e imersos em água saturada com cal, para a cura, até o dia que seriam rompidos. “O objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível de saturado, até que os espaços da pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, tenham sido preenchidos pelos produtos de hidratação do cimento” (NEVILLE, 1997). O tempo e umidade da cura são dois fatores de grande importância para o processo de hidratação, que como em todas as outras reações tem a temperatura como um acelerador e consequentemente influenciando o processo, portanto é importante se manter o local a uma temperatura ambiente, de aproximadamente 23°C (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Nesse caso, a temperatura ficou em $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. A função da cal é evitar a saída dos íons de cálcio para a água.

3.5 Equipamentos e parâmetros de ensaio

3.5.1 Ensaio de Kantro ou *mini-slump*

O ensaio de *mini-slump* foi desenvolvido por Kantro em 1980 e consiste na determinação do abatimento da pasta de cimento por meio do minitronco. O ensaio foi realizado com uma pequena quantidade de pasta, usando um tronco de cone de acrílico com diâmetro inferior de 38 mm, diâmetro superior de 19 mm e altura de 57 mm.

O tronco de cone era centralizado em uma placa de vidro, preenchido com a pasta e feito o rasamento. O molde era então retirado e esperava-se até o espalhamento se estabilizar. Eram feitas 4 medidas com paquímetro e tirava-se a média para obter a abertura de espalhamento, na [Figura 12](#) pode-se observar os materiais e instrumentos utilizados neste ensaio.

Figura 12: Ensaio de Kantro ou mini-slump



Fonte: AUTORA

3.5.2 Ensaio de Calorimetria por Condução

A calorimetria isotérmica tem sido utilizada em pesquisas por apresentar a vantagem de determinar a evolução cinética de hidratação do cimento nas primeiras 72 horas, período que abrange o início e o fim da pega. Esse ensaio permite comparar a reatividade dos diferentes tipos de cimento, bem como a influência de alguns parâmetros como finura, temperatura de hidratação, presença de adições e aditivos e suas quantidades, e relacionar com propriedades reológicas ([CINCOTTO, 2011](#)).

A medida do fluxo de calor é contínua e como resultado tem-se a curva de calor liberado e a curva de calor acumulado, em W/g de cimento versus tempo, valores

calculados em J/g de cimento (CINCOTTO, 2011).

Esse ensaio foi realizado na UFSC, no Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC). O equipamento utilizado foi o calorímetro de condução isotérmica Thermometric AB da TAM Air (TA Instruments) de oito canais, com sistema informatizado de aquisição de dados, com frequência média de leitura a cada 30 segundos.

Após a pasta ser preparada, aproximadamente 15 gramas eram colocados em pequenos frascos de vidros e levados ao calorímetro, como mostra a Figura 13.

Figura 13: Amostras para o Ensaio de Calorimetria



Fonte: AUTORA

O Ensaio foi realizado duas vezes, monitorando o perfil de liberação de calor na hidratação das pastas de cimento Portland por 72 horas.

3.5.3 Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico

O ensaio utilizado baseia-se na norma ASTM (1999) e caracteriza-se por ser um método dinâmico não destrutivo, que através da técnica de excitação por impulso mede frequências naturais e determina o módulo de elasticidade dos materiais. O equipamento utilizado nesse ensaio foi da Sonelastic®, da ATPC Engenharia.

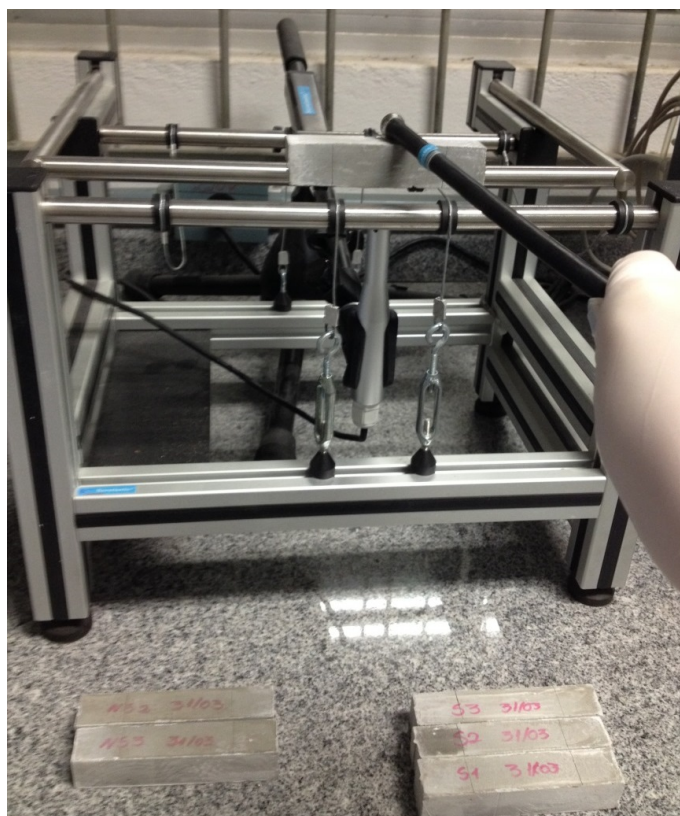
A técnica consiste em um pequeno impacto no ponto médio de seu comprimento, sendo que neste há um captador acústico, como observado na Figura 14.

O sinal obtido passa por um processamento de FFT (Transformada rápida de Fourier) para obter os picos de frequências naturais de vibração. A resposta acústica

é resultado do impacto no corpo de prova e é originada pelas frequências naturais de vibração, essas frequências dependem da massa, geometria, dimensões e principalmente do módulo de elasticidade de cada corpo de prova.

O equipamento é direcionado para amostras retangulares com comprimento entre 30 e 540 mm, largura e altura entre 5 e 150 mm e é composto por captadores (CA-PD com base de montagem vertical), suportes (SA-BC - os fios de sustentação do suporte SA-BC são presos em âncoras móveis deslizantes que permitem o ajuste da abertura, visto que os fios devem ficar a uma distância igual a $0,224 L$ das extremidades do corpo de prova de modo a favorecer o modo de ressonância flexional) e pulsador (manual PM-HL).

Figura 14: Ensaio de Módulo de Elasticidade



Fonte: AUTORA

3.5.4 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

Os ensaios mecânicos na pasta de cimento foram realizados na prensa Instron 5569, ilustrada na [Figura 15](#). A velocidade de carga foi a recomendada na [ABNT \(2005\)](#) de 50 N/s e foram utilizados corpos de prova $2 \times 2 \times 10 \text{ cm}^3$. A carga era aplicada no centro do corpo de prova e este era colocado em apoios distanciados de 60 mm. Os corpos de prova foram rompidos aos 3, 7 e 28 dias.

Para o cálculo da resistência à tração na flexão utilizou-se a Equação 3.1, baseada na equação contida na [ABNT \(2005\)](#):

$$R_t = \frac{1,5F_tL}{bh^2} \quad (3.1)$$

R_t = resistência à tração na flexão, em megapascal (MPa);

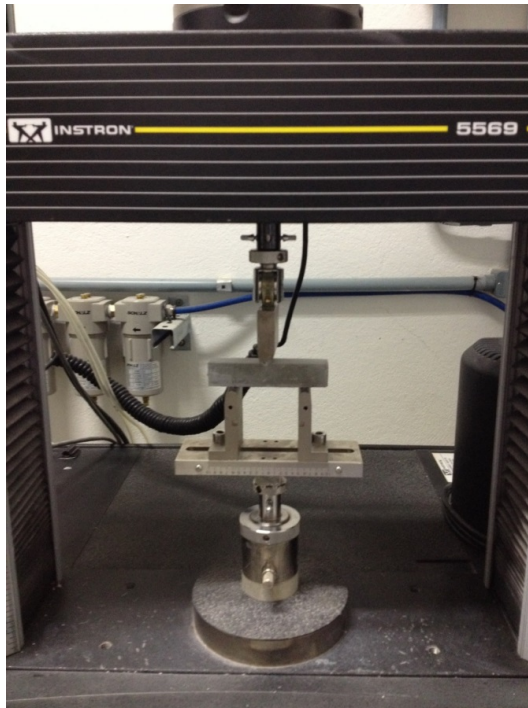
F_t = carga máxima aplicada, em Newton (N);

L = distância entre os apoios, em milímetros (mm);

b = largura do corpo de prova, em milímetros (mm);

h = altura do corpo de prova, em milímetros (mm).

Figura 15: Ensaio de Resistência à Tração na Flexão



Fonte: AUTORA

3.5.5 Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos

O ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos foi realizado na prensa Instron 5569, com o auxílio de duas placas de 20x20 mm localizadas no centro do corpo de prova, na parte superior e inferior, como ilustra a Figura 14. A velocidade de aplicação da carga foi a recomendada na [ABNT \(2005\)](#) de 500 N/s. O ensaio foi realizado aos 3, 7 e 28 dias de idade dos corpos de prova, provenientes das metades dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão. Para o cálculo da resistência à

compressão axial utilizou-se a Equação 3.2, baseada na equação contida na [ABNT \(2005\)](#):

$$R_c = \frac{F_c}{400} \quad (3.2)$$

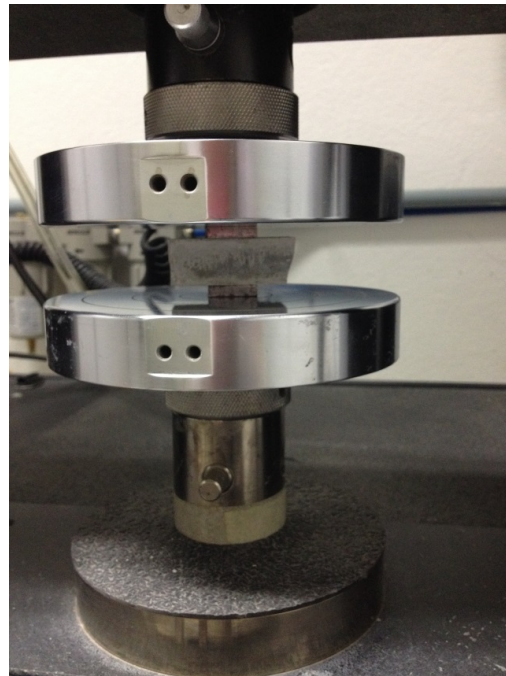
Onde:

R_c = resistência à compressão, em megapascal (MPa);

F_c = carga máxima aplicada, em Newton (N);

400 = área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 20 mm x 20 mm, em milímetros quadrados (mm^2).

Figura 16: Ensaio de resistência à compressão



Fonte: AUTORA

3.5.6 Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos

O ensaio de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos foi realizado aos 3, 7 e 28 dias, na prensa Instron 5569, com o auxílio de uma rótula de 30 mm de diâmetro para garantir o paralelismo, como observado na [Figura 17](#). A velocidade da carga aplicada foi a recomendada na [ABNT \(1996\)](#) de 0,25 MPa/s.

Os corpos de prova cilíndricos eram inicialmente fresados em uma cortadeira metalográfica Isomet da marca Bluehler, de modo a obter 40 mm de altura, como pode ser visto na [Figura 18](#).

Para o cálculo da resistência à compressão utilizou-se a Equação 3.3, baseada na equação contida na [ABNT \(1996\)](#):

$$R_C = \frac{F_C}{\pi R^2} \quad (3.3)$$

Onde:

R_C = resistência à compressão, em megapascal (MPa);

F_C = carga máxima aplicada, em Newton (N);

R = raio do cilindro em milímetros (mm).

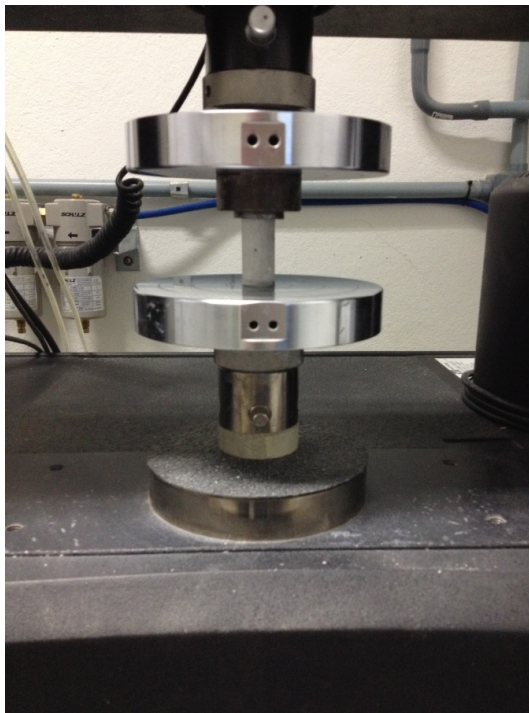


Figura 17: Ensaio de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos

Figura 18: Fresagem dos corpos de prova cilíndricos



Fonte: AUTORA

3.5.7 Ensaio BET

O método BET (Brunauer-Emmett-Teller) é um dos processos mais usados para a obtenção da área superficial de materiais sólidos e envolve a seguinte equação:

$$\frac{1}{W((P_o/P) - 1)} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C - 1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_o} \right),$$

onde W é o peso de gás adsorvido na pressão relativa, P/P_o , e W_m é o peso de adsorbato constituindo uma monocamada de cobertura de superfície. O termo C é a constante BET e está relacionado com a energia de adsorção na primeira camada adsorvida e, conseqüentemente, este valor é uma indicação da magnitude das interações adsorvente/adsorbato.

As amostras prismáticas, depois de rompidas com 28 dias, foram colocadas 24 horas em nitrogênio líquido para que o processo de hidratação não continuasse. O nitrogênio fez com que ocorresse o congelamento instantâneo da água nos poros, evitando que houvesse os 10% de expansão da água e danos à microestrutura das amostras.

Posteriormente, as amostras permaneciam em um liofilizador a fim de que o gelo que agora encontrava-se nos poros saísse na forma de gás, desse modo as amostras já estavam prontas para o ensaio BET.

O ensaio foi realizado na Central de Análises do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC, no equipamento modelo Quantachrome

Instruments – Autosorb-1, observado na [Figura 19](#).

Figura 19: Equipamento utilizado no ensaio BET



Fonte: AUTORA

O AUTOSORB-1 opera através da medida da quantidade de gás adsorvido e desorvido na superfície de um sólido com determinada pressão de vapor de equilíbrio através de um método volumétrico estático. Os dados são obtidos através da adição ou remoção de uma quantidade de gás conhecida em uma célula de amostra contendo o sólido adsorvente, mantendo a temperatura constante abaixo da temperatura crítica do adsorbato. Enquanto ocorre a adsorção ou dessorção a pressão na célula de amostra muda até o equilíbrio ser alcançado. A quantidade de gás adsorvido ou desorvido na pressão de equilíbrio é a diferença entre a quantidade de gás adicionada ou removida e a quantidade requerida para preencher o espaço em volta do adsorvente (espaço vazio).

Foi possível determinar as áreas superficiais de cada amostra através das isotermas de adsorção de nitrogênio, a distribuição dos diâmetros dos poros bem como o diâmetro médio dos mesmos.

4 Resultados e Discussões

4.1 Definição do teor de superplastificante

A dosagem de superplastificante utilizada nas pastas com a adição de nanossílica foi estabelecida por tentativa e erro, até se aproximar da abertura no ensaio de *mini-slump* da pasta de referência. Para as pastas com nanossílica em pó utilizou-se 0,09% em relação à massa de cimento e para as pastas com nanossílica sonicada em água utilizou-se 0,10% em relação à massa de cimento. Tais valores foram obtidos colocando uma quantidade inicial e depois aumentando ou diminuindo esta, conforme o necessário. As aberturas da pasta de referência podem ser observadas na Tabela 8, e os teores de superplastificante colocados bem como as respectivas aberturas das pastas com nanossílica podem ser vistos nas Tabelas 9 e 10. Assim que o teor “ideal” era encontrado a pasta era feita por mais duas vezes para garantir que o resultado se repetisse.

Tabela 8: Abertura da pasta de referência (*mini-slump*)

teor de sp (%)	abertura (mm)
-	81,62
-	79,85
-	79,52
Média (mm)	80,33
Desv. Padrão	1,13

Fonte: AUTORA

Tabela 9: Abertura da pasta com 2,5% de nanosílica não sonicada e com superplastificante (*mini-slump*)

teor de sp (%)	abertura (mm)
0,12	100,00
0,08	75,58
0,09	79,45
0,09	79,04
0,09	80,30
Teor adotado (%)	0,09
Média (mm)	79,60
Desv. Padrão	0,64

Fonte: AUTORA

Tabela 10: Abertura da pasta sonicada com 2,5% de nanosílica e com superplastificante (*mini-slump*)

teor de sp (%)	abertura (mm)
0,08	73,58
0,09	75,92
0,10	81,20
0,10	78,95
0,10	80,85
Teor adotado (%)	0,10
Média (mm)	80,33
Desv. Padrão	1,21

Fonte: AUTORA

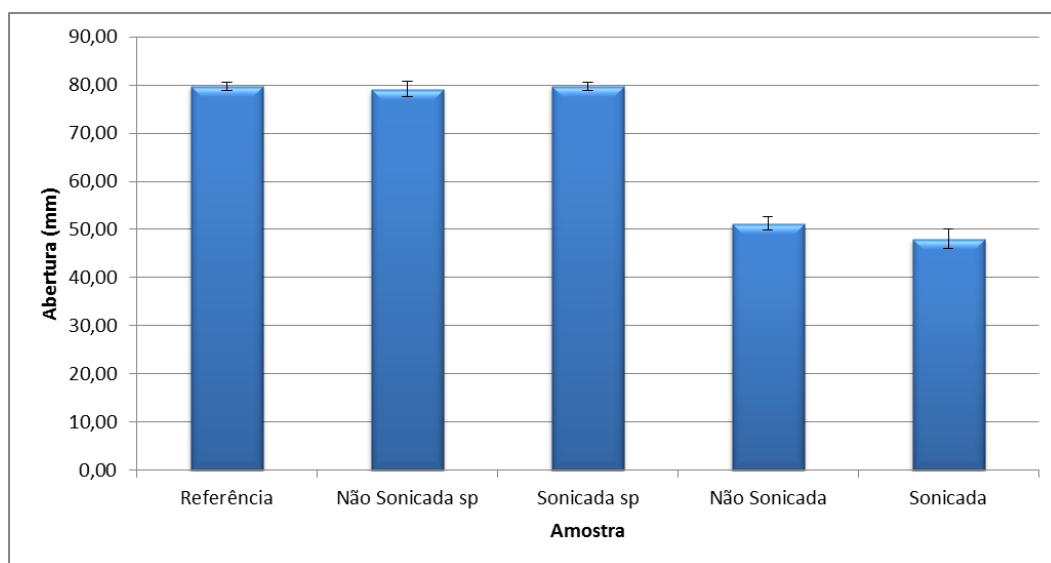
Pode-se observar que a com a sonicação as partículas de nanosílica ficam menos aglomeradas ¹, o que aumenta a área superficial disponível, gerando um “consumo” um pouco maior de superplastificante em relação a pasta não sonicada para manter uma abertura fixa no ensaio de *mini-slump*.

¹ Isso não quer dizer que elas estejam totalmente desaglomeradas

4.2 Ensaio de Kantro ou *mini-slump*

Ao serem confeccionadas, as pastas não sonicada e sonicada apresentaram, respectivamente, uma abertura do tronco de cone 36% e 40% menor do que a pasta de referência. Na [Figura 20](#) pode-se observar os valores de abertura do tronco de cone de cada lote produzido.

Figura 20: Abertura do tronco de cone das pastas



Fonte: AUTORA

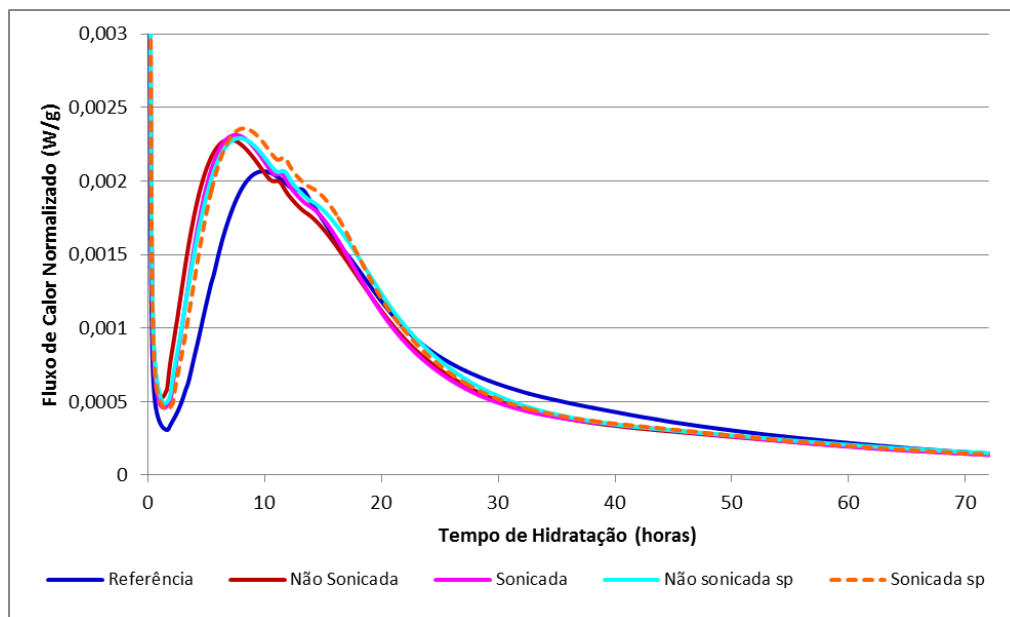
Como esperado, a alta área superficial da nanossílica fez com que menos água ficasse disponível para a mistura, sendo que, mesmo com o uso do superplastificante, era possível notar uma maior viscosidade das pastas contendo nanossílica quando comparadas com as pastas de referência.

4.3 Ensaio de Calorimetria por Condução

A finalidade do ensaio de calorimetria é avaliar se a adição de nanossílica e também do uso de superplastificante influenciavam na hidratação do cimento. A partir dos dados obtidos pelo *software* do calorímetro foi possível gerar os gráficos de fluxo de calor e calor total liberado (Figuras [21](#) e [25](#)). Os resultados individuais podem ser observados no Apêndice B.

Analizando a [Figura 21](#), pode-se observar primeiramente o período de indução e posteriormente o período de aceleração. Em todas as curvas de fluxo de calor foi possível observar um pico inicial, o qual foi desconsiderado devido à não disponibilidade de fazer a mistura das pasta no próprio calorímetro. Nota-se que a adição de nanossílica diminui o

Figura 21: Fluxo de Calor das pastas de cimento



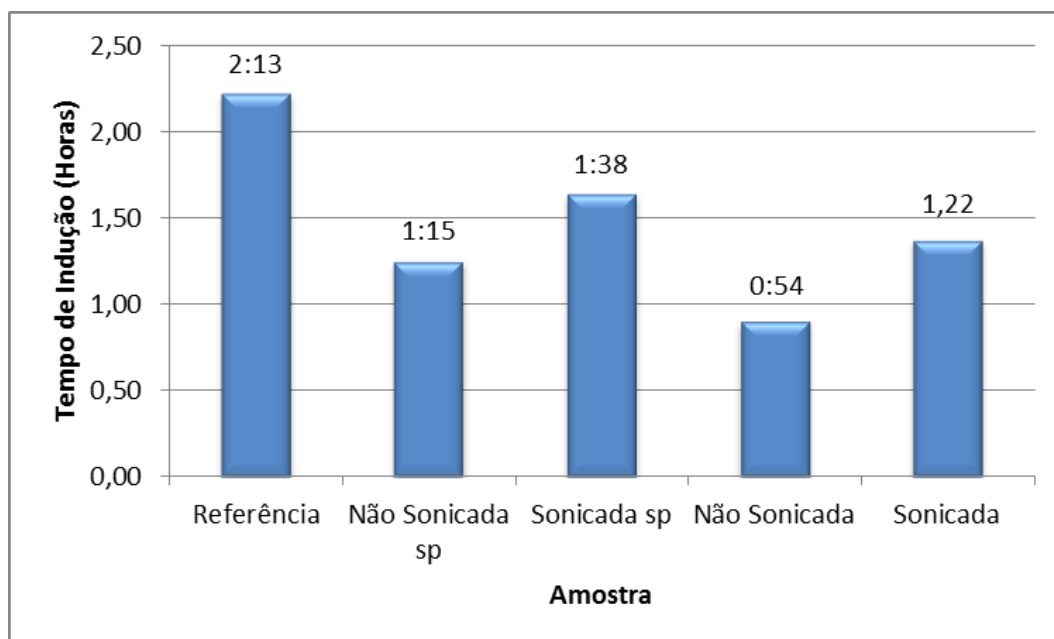
Fonte: AUTORA

período de indução, principalmente quando adicionada na forma de pó. Também pode-se observar que o uso de superplastificante aumenta o tempo de indução.

Em função do método de sonicação em água, é possível que haja uma maior retenção da mesma por parte da nanossílica, em função de sua maior dispersão. Com isso, acaba havendo menos água disponível para o processo de hidratação do cimento. As Figuras 22 e 23 mostram detalhadamente o período de indução de cada pasta.

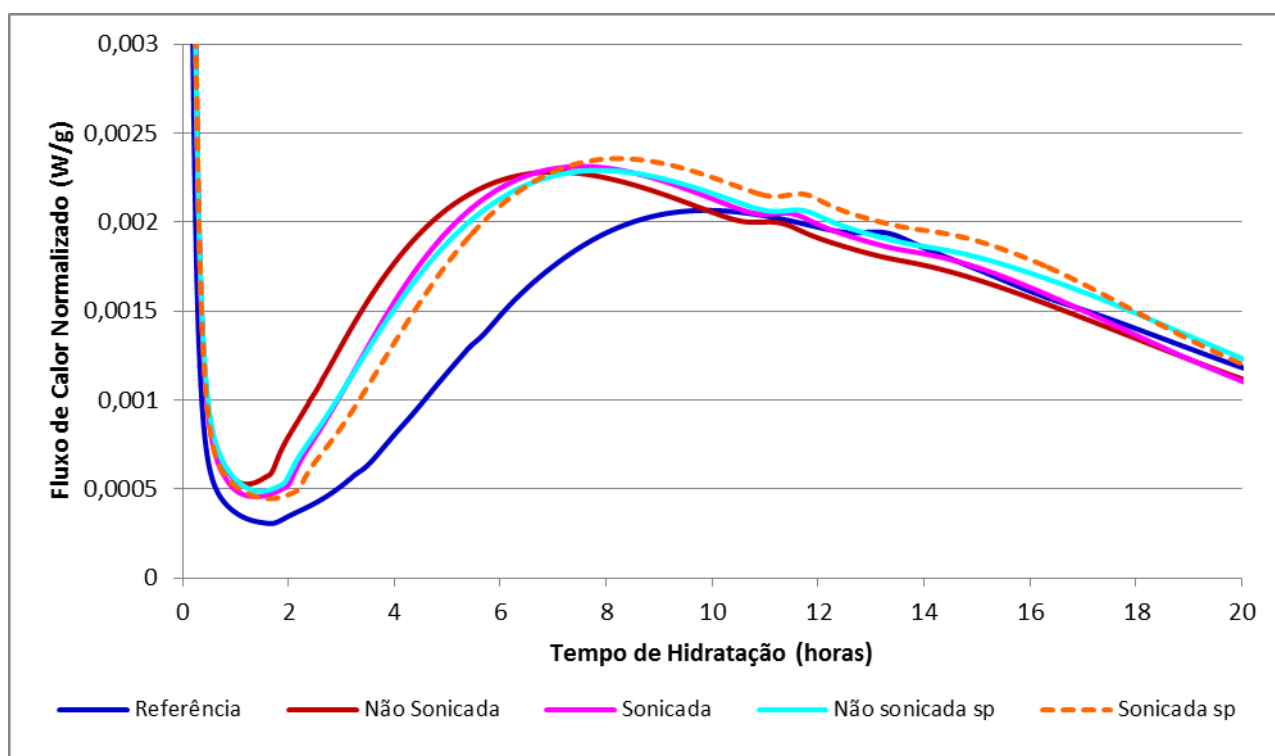
Menores períodos de indução foram também observados por [Madani, Bagheri e Parhizkar \(2012\)](#), com testes de Vicat para a determinação do início e fim de pega das pastas estudadas. Utilizando nanossílicas, na forma de hidrossol, com 3 diferentes áreas superficiais (100, 200 e 300 m^2/g) e uma relação água/sólidos (cimento + nanossílica) de 0,27 observou-se que quanto maior a área da nanossílica menor era o tempo de início de pega (que coincide com o final do período de indução) e que isso ocorria devido à redução da concentração dos íons de cálcio - por causa da rápida reatividade pozolânica da nanossílica - e através do aumento da concentração dos íons silicato: a nanossílica pode acelerar a transformação de C-S-H metaestável (precipitado nos grãos) em uma forma mais estável, diminuindo assim o período de indução.

Figura 22: Período de indução das pastas de cimento



Fonte: AUTORA

Figura 23: Detalhe dos períodos de indução e aceleração

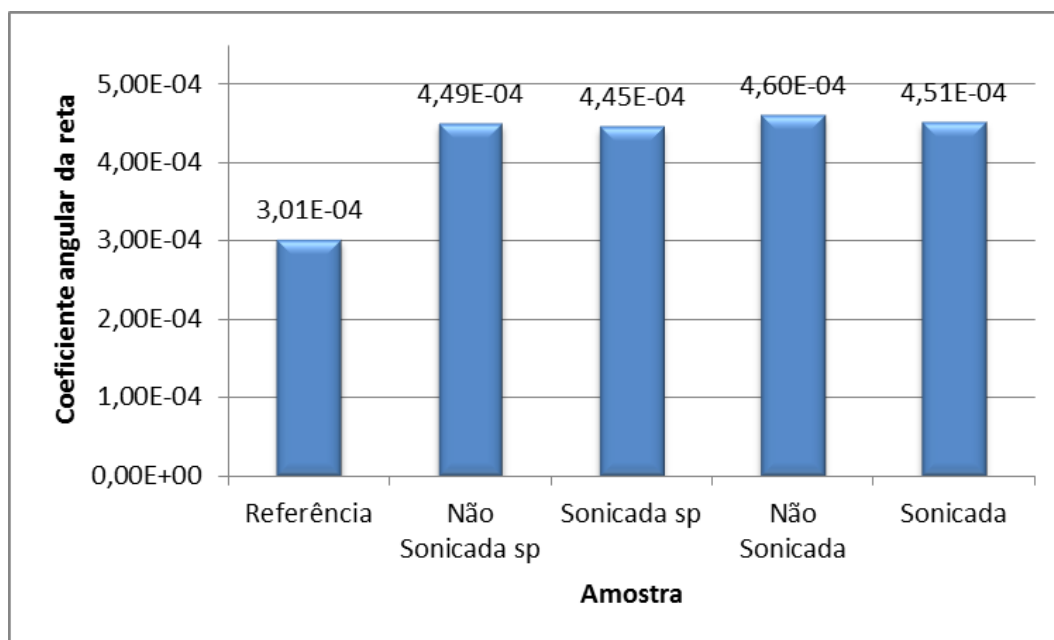


Fonte: AUTORA

Foi gerado também um gráfico com os coeficientes angulares das retas referentes

ao período de aceleração, [Figura 24](#).

Figura 24: Coeficiente angular das retas que representam o período de aceleração



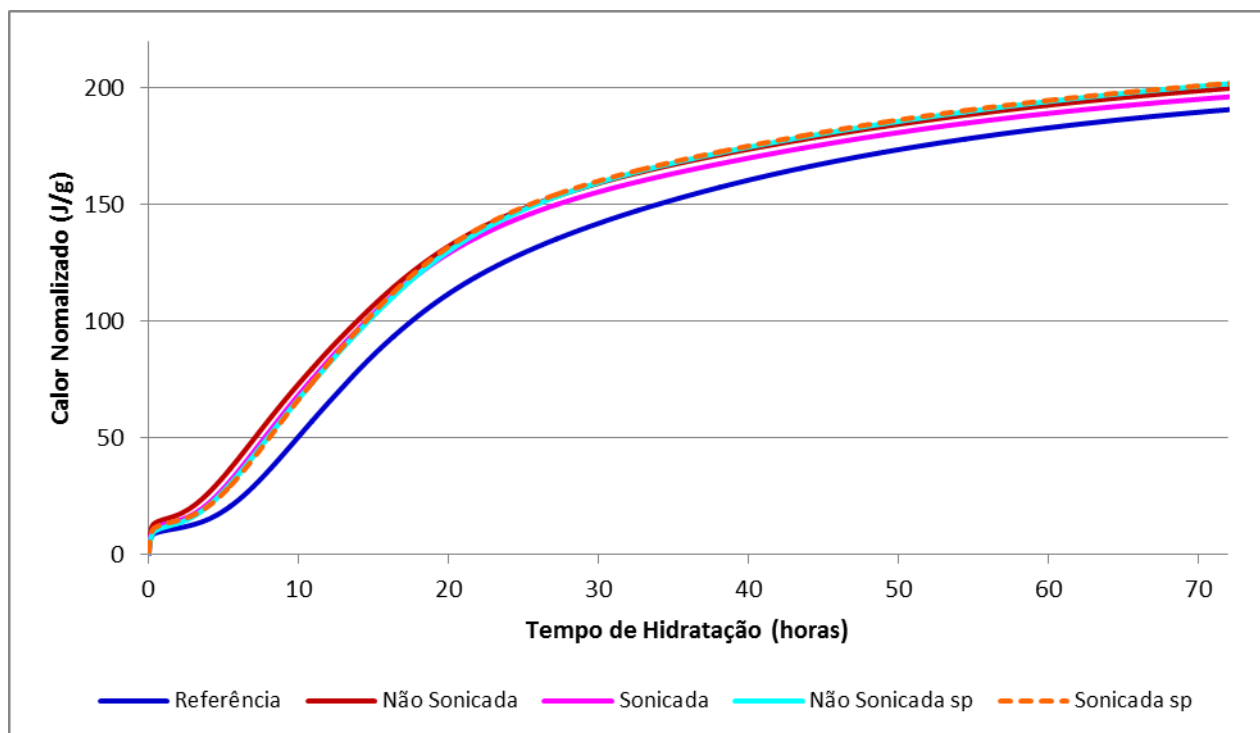
Fonte: AUTORA

Com esses coeficientes nota-se que a adição de nanossílica aumenta a taxa de liberação de calor durante o período de aceleração das pastas de cimento, sendo esse aumento um pouco maior nas pastas sem superplastificante, indicando que o uso deste implica em uma menor velocidade das reações. Porém, devido a presença de nanossílica a velocidade das reações ainda é maior quando comparada com a pasta de referência.

Alguns autores, [Thomas, Jennings e Chen \(2009\)](#), acreditam que o fato de as pastas com nanossílica apresentarem maior coeficiente angular, e portanto maior aceleração, é devido ao fenômeno de “nucleação heterogênea”, sendo que segundo essa teoria, quanto menor o tamanho da partícula, maior a aceleração. No entanto, [Kong et al. \(2013\)](#) adicionado nanossílica e microssílica, observaram que a nanossílica, mesmo com maiores aglomerados, apresentou maior aceleração. Eles atribuíram esse fato, então, à alta reatividade pozolânica da nanossílica, que consome íons de cálcio e faz com que a reação entre C_3S e a água ocorra mais rapidamente.

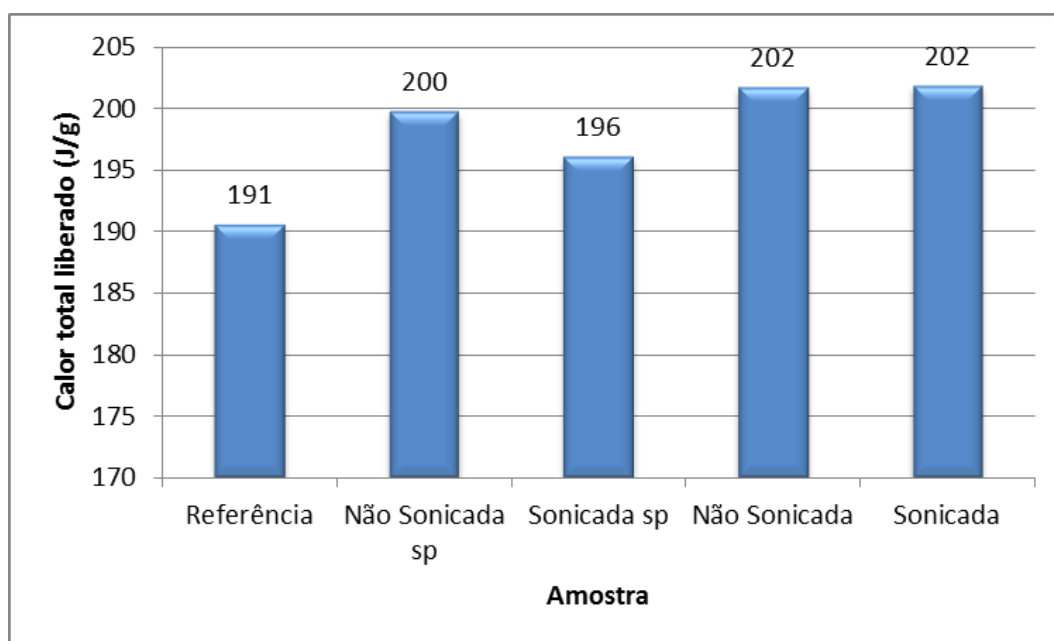
Com as curvas de calor total liberado, [Figura 25](#), foi possível obter a quantidade de calor liberada por cada pasta de cimento que pode ser observada na [Figura 26](#).

Figura 25: Curvas de calor total liberado na hidratação das pastas de cimento



Fonte: AUTORA

Figura 26: Calor total liberado na hidratação das pastas de cimento



Fonte: AUTORA

A quantidade total de calor liberada após 72 horas de hidratação foi levemente

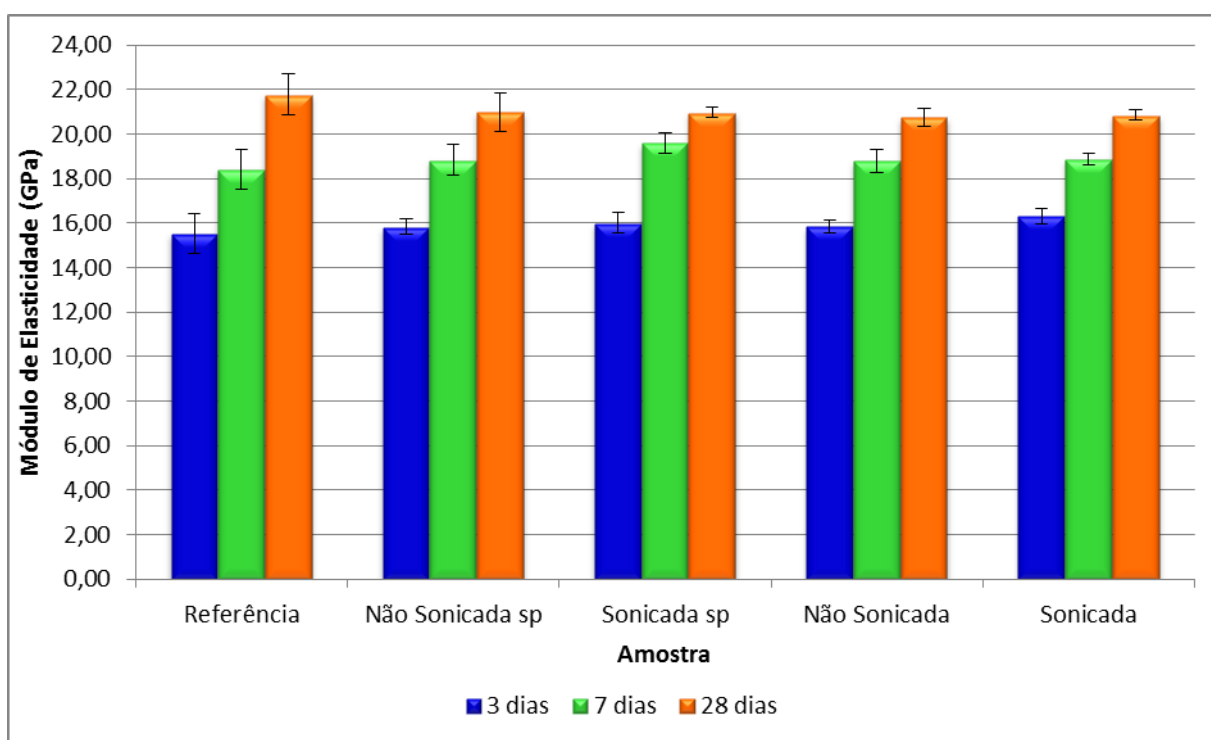
maior para as pastas com adição de nanossílica e sem superplastificante.

Analisando os dados em conjunto, devido ao fato de as curvas de aceleração serem mais acentuadas, à menores períodos de indução e à maiores quantidades de calor liberado, pode-se dizer que houve uma aceleração no processo de hidratação do cimento pela nanossílica.

4.4 Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico

Na Figura 27 estão apresentados os resultados do módulo de elasticidade dinâmico, realizado nos corpos de prova prismáticos, aos 3, 7 e 28 dias de hidratação. Para cada corpo de prova foram medidos 5 valores e então fazia-se a média destes para encontrar o módulo de elasticidade dinâmico de cada corpo de prova. Os resultados individuais podem ser observados no Apêndice C.

Figura 27: Médias dos módulos de elasticidade dinâmico dos corpos de prova prismáticos



Fonte: AUTORA

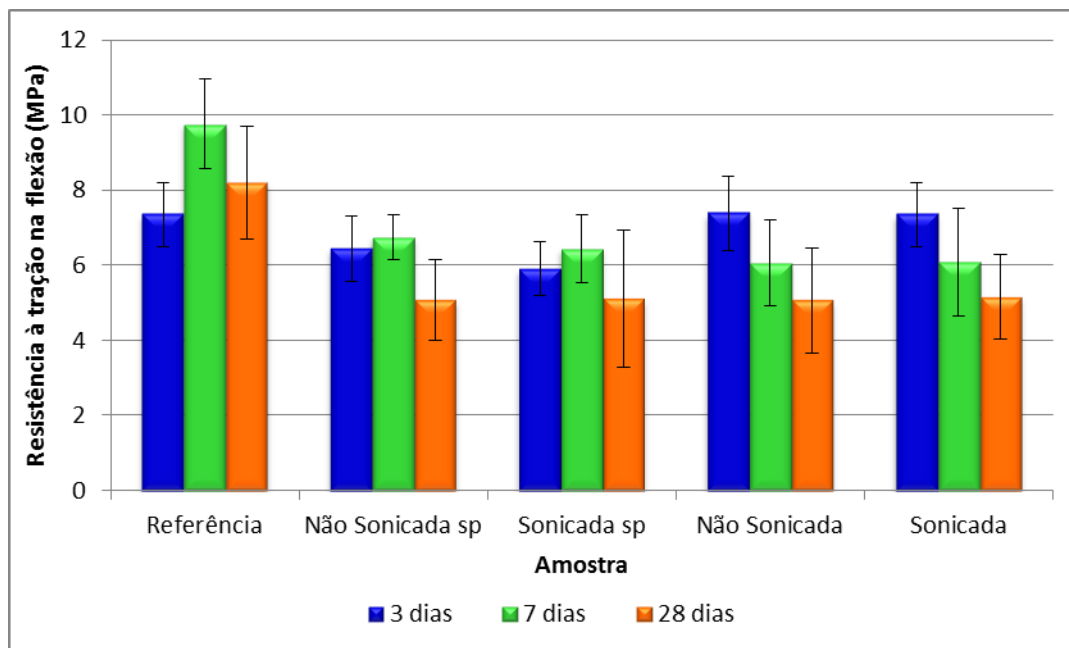
Não foi possível observar diferenças significativas nos valores de módulo de elasticidade dinâmico das pastas de cimento, comprovando que nem a adição de nanossílica nem o uso de superplastificante causam alteração nos mesmos.

4.5 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

Para a realização dos ensaios de resistência à tração na flexão foram usados os mesmos corpos de prova utilizados no ensaio de módulo de elasticidade, uma vez que este é um ensaio não destrutivo. Os resultados individuais podem ser observados no Apêndice D.

Na Figura 28 pode-se observar que, para a idade de 3 dias, a forma de adição da nanossílica não apresentou mudanças significativas, comparando com a pasta de referência. O que apresentou mudanças foi o uso de superplastificante. Houve uma perda de 12% para a nanossílica adicionada na forma de pó e de quase 20% para a nanossílica adicionada sonicada em água, lembrando que a quantidade de superplastificante em pastas com adição de nanossílica em pó é menor.

Figura 28: Médias das resistências à tração na flexão



Fonte: AUTORA

Aos 7 dias, as pastas com nanossílica, tanto em pó como sonicada em água, e sem superplastificante apresentaram uma perda de resistência de 38%. As pastas com o uso de superplastificante apresentaram perda de 31% para o caso de adição de 0,09% e 34% para o caso de adição de 0,10%.

Para a idade de 28 dias todas as pastas apresentaram uma perda de cerca de 38% quando comparadas com a pasta de referência. Isso pode ter ocorrido pelo fato de que, apesar da energia aplicada e o cuidado na hora do adensamento e moldagem dos corpos de prova, o visível aumento da viscosidade devido à presença de nanossílica, mesmo com o uso de superplastificante, prejudicou os mesmos, dificultando a saída do ar na hora do

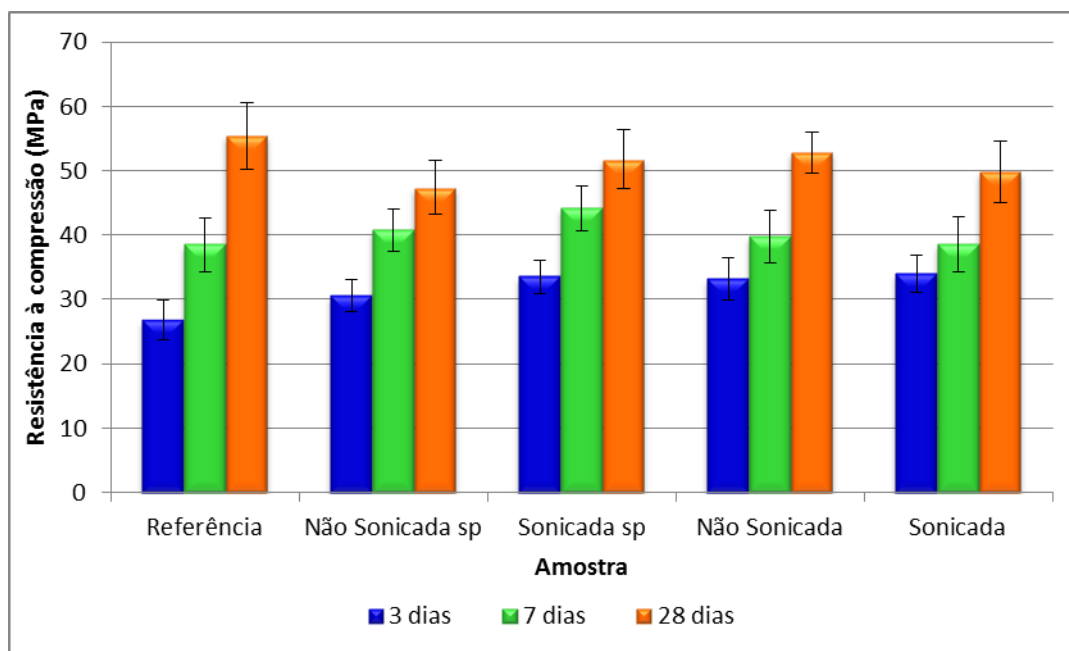
adensamento, formando poros maiores que 150 nm que não foram detectados pela análise BET, como será visto posteriormente. Pode ser também que os aglomerados de nanossílica tenham formado pontos fracos nos corpos de prova e que estes tenham prejudicado apenas a resistência à tração dos mesmos.

4.6 Ensaio de Resistência à Compressão dos corpos de prova prismáticos

Uma metade de cada corpo de prova prismático, depois de rompido à flexão, foi rompido à compressão. Os resultados individuais podem ser observados no Apêndice E.

Na Figura 29 estão apresentados as médias e os desvios-padrão dos corpos de prova prismáticos. Nela, é possível observar que as resistências iniciais (3 dias) é maior para todas as amostras com nanossílica, confirmando que a alta reatividade inicial que acelera o processo de hidratação do cimento e que pôde ser vista no ensaio de calorimetria, gera maiores resistências iniciais.

Figura 29: Médias das resistências à compressão dos corpos de prova prismáticos



Fonte: AUTORA

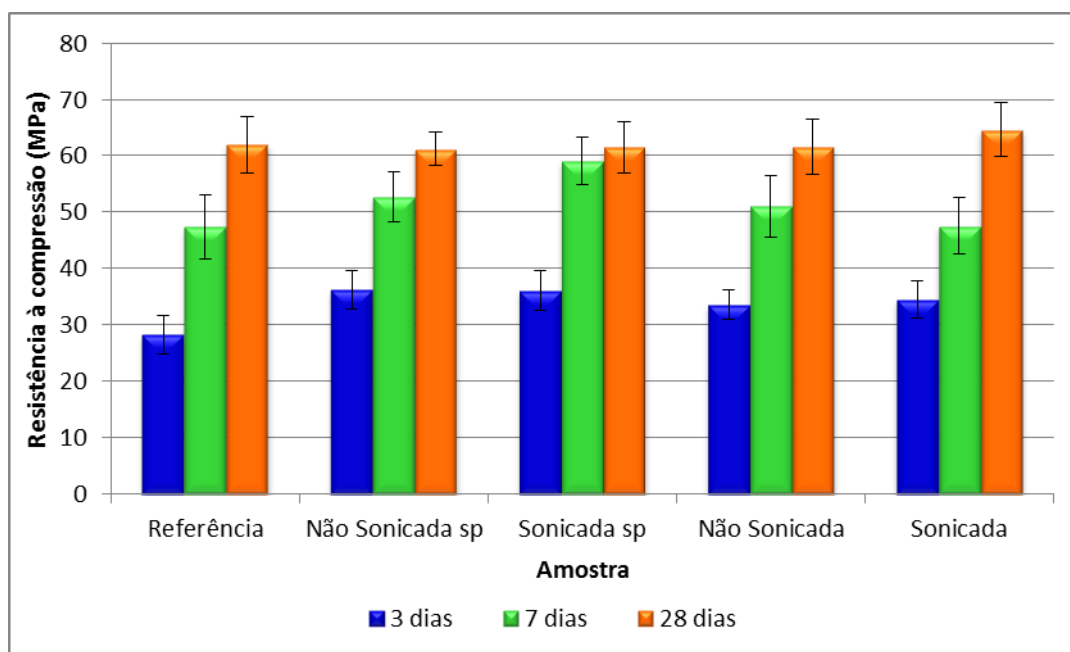
O ganho de resistência proporcionado pela adição de nanossílica foi diminuindo conforme a hidratação foi ocorrendo até ficar um pouco abaixo da referência aos 28 dias. É possível que a menor resistência à tração na flexão tenha influenciado na resistência à compressão, devido à possíveis maiores números de microfissuras gerados na tração e que sensibilizaram os corpos de prova.

4.7 Ensaio de Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos

Os corpos de prova cilíndricos foram rompidos aos 3, 7 e 28 dias. Os resultados individuais podem ser observados no Apêndice F.

Na [Figura 30](#) estão apresentados as médias e os desvios-padrão dos corpos de prova cilíndricos.

Figura 30: Médias das resistências à compressão dos corpos de prova cilíndricos



Fonte: AUTORA

Pode-se observar que a resistência inicial das amostras com nanossílica é maior nas idades iniciais, até 28% maior, e chega praticamente à mesma resistência das amostras de referência, dessa vez não influenciada pela tração inicial, levando a valores maiores de resistência que os dos corpos de prova prismáticos. A maior resistência nos primeiros dias pode estar relacionada à aceleração da hidratação do cimento causada pela nanossílica.

As mudanças não significativas na resistência à compressão aos 28 dias também foram observadas por [Berra et al. \(2012\)](#). Utilizando nanossílica em suspensão em quantidades de 0,8 e 3,8 % em relação ao peso de cimento, eles observaram mudanças de 17,4% para as pastas com 3,8% de adição, aos 28 dias. Porém, esse ganho foi atribuído, em sua maior parte, ao hidróxido de sódio usado como estabilizante.

4.8 Ensaio BET

As amostras analisadas foram as prismáticas na idade de 28 dias. Na Tabela 11 é possível observar os valores de área superficial, diâmetro médio e volume de poros.

Tabela 11: Resultados obtidos com a análise BET

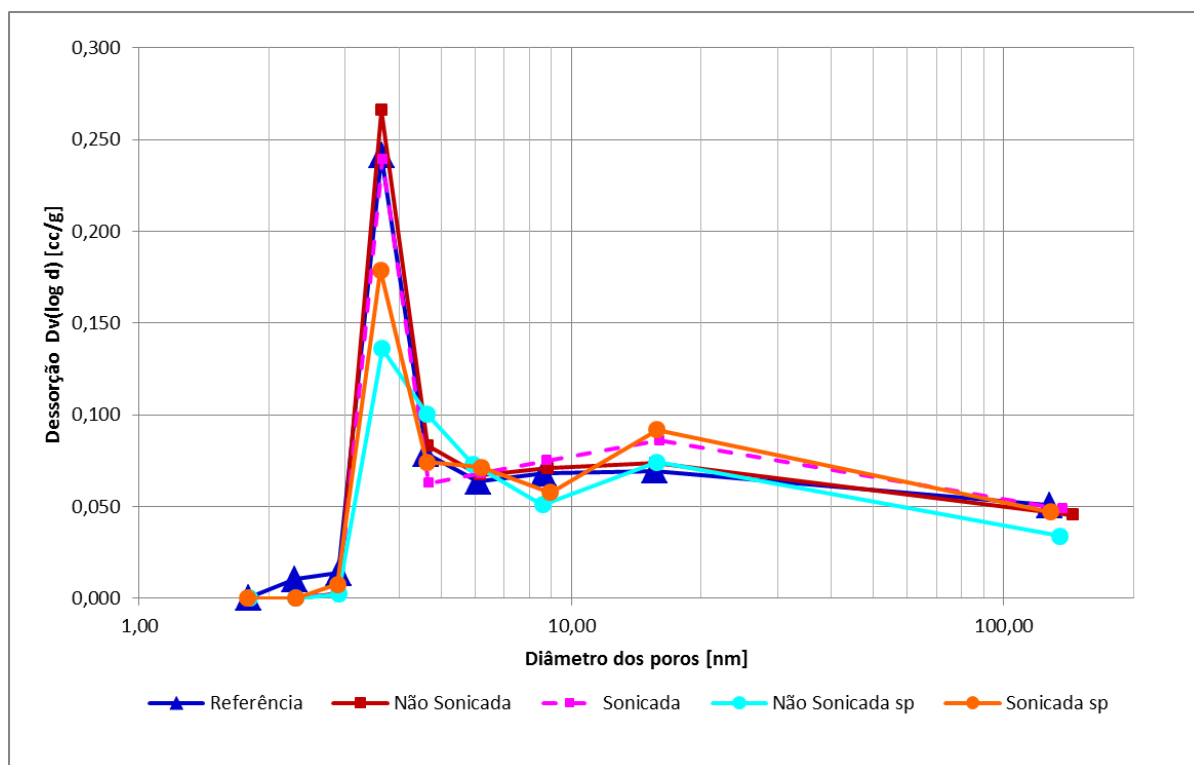
Lote	Área Superficial (m^2/g)	Diâmetro médio (nm)	Volume total (cm^3/g)
Referência	43,040	11,620	0,129
Não Sonicada sp	30,350	12,940	0,101
Sonicada sp	33,320	14,280	0,124
Não Sonicada	41,160	12,180	0,131
Sonicada	39,900	12,850	0,132

Fonte: AUTORA

Nesta tabela pode-se observar que a adição de nanossílica implicou em valores menores de área superficial e poros com diâmetros médios maiores que os da pasta de referência tanto no caso das pastas com adição de nanossílica e sem superplastificante quanto nas pastas com adição de nanossílica e com superplastificante. É possível notar também que, para os casos com o uso de superplastificante, o volume total de poros é menor que o das pastas de referência e, para os casos sem o uso de superplastificante, este é maior que as pastas de referência. No entanto, em se tratando de diâmetro de poros, a análise da sua distribuição se faz mais coerente do que apenas o diâmetro médio.

Na Figura 31 pode-se observar a distribuição dos diâmetros dos poros.

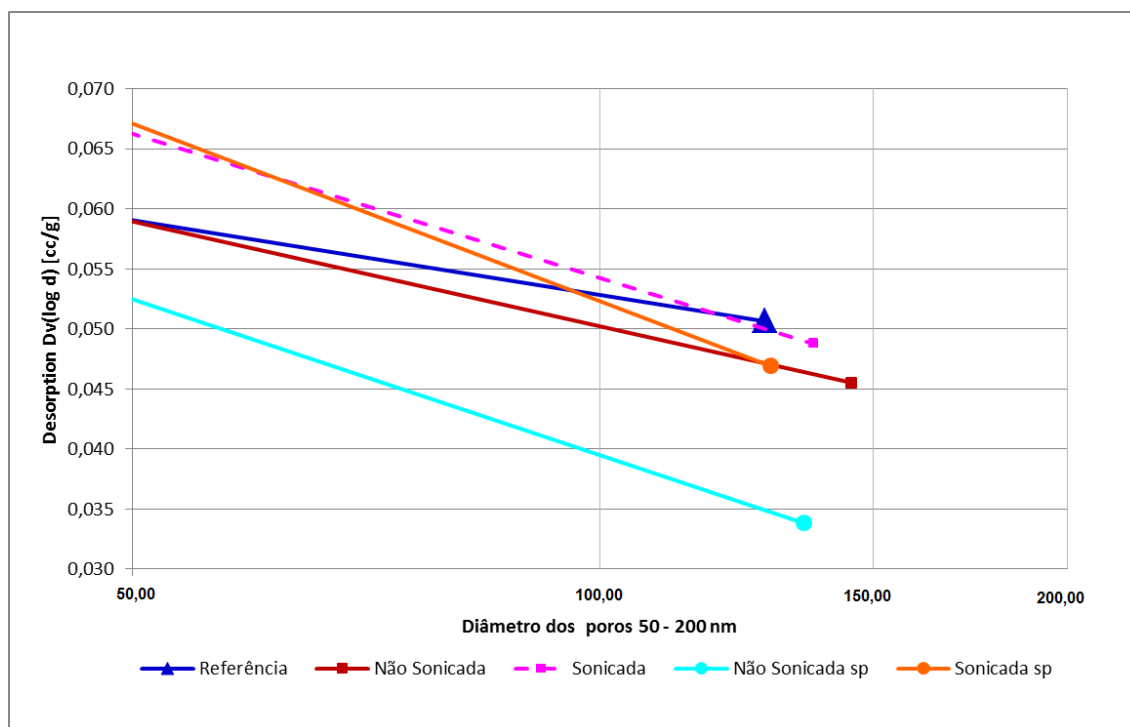
Figura 31: Distribuição dos diâmetros dos poros



Fonte: AUTORA

Não foi possível observar poros maiores que 150 nm e não pode-se afirmar que estes não existam. Na [Figura 32](#) é possível observar os poros de 50 a 150 nm.

Figura 32: Distribuição dos diâmetros dos poros (50 - 150 nm)



Fonte: AUTORA

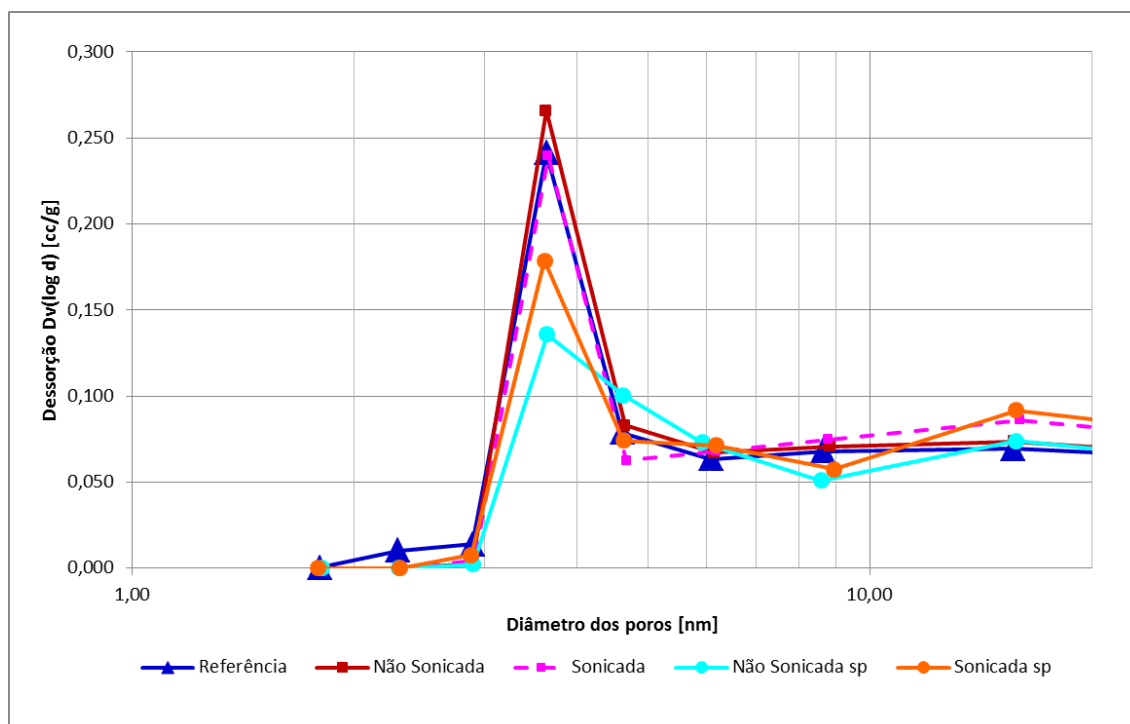
Como pode ser observado as pastas com adição de nanossílica não sonicada, com e sem superplastificante, apresentam um menor volume de poros nessa faixa e as pastas com adição de nanossílica sonicada apresentam um maior volume de poros de 50 a 100 nm.

Kong et al. (2012), também observaram tal fato. Para poros acima de 100 nm, as pastas com incorporação de nanossílica apresentam um menor volume de poros quando comparados com as pastas de referência e comentaram que isso é devido à rápida reatividade pozolânica da nanossílica: a nanossílica reage rapidamente com o hidróxido de cálcio, formando C-S-H e preenchendo os poros maiores.

Segundo os mesmos autores, existe também a nanoporosidade: de 20 - 100 nm, encontrados no C-S-H de baixa densidade e menor que 20 nm, encontrados no C-S-H de alta densidade.

Como pode ser visto na Figura 33, para os poros menores que 20 nm, as pastas com o uso de superplastificante, tanto para a nanossílica sonicada em água quanto para a adicionada na forma de pó, apresentam ora o volume de poros maior, ora menor, quando comparadas com a pasta de referência. Para os casos sem superplastificante o volume de poros se mantém praticamente o mesmo da pasta de referência. No entanto, como já comentado anteriormente, esse tamanho de poro não causa mudanças nas resistências mecânicas.

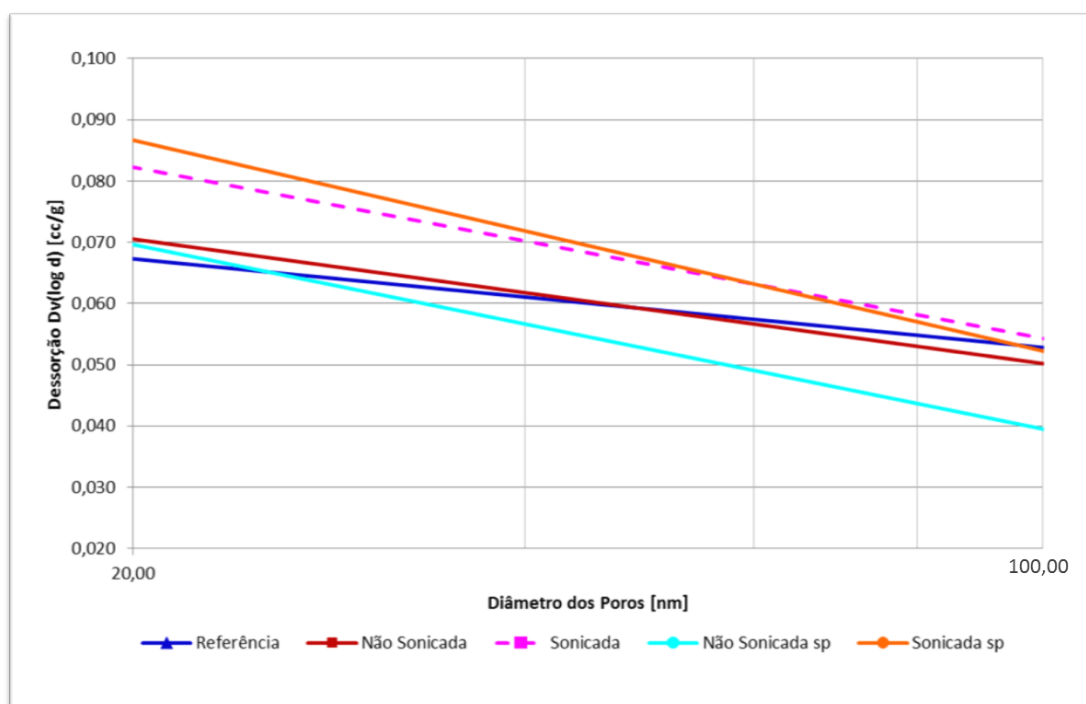
Figura 33: Distribuição dos poros menores que 20 nm



Fonte: AUTORA

Agora no que diz respeito aos poros de 20 a 100 nm, observado na [Figura 34](#), as pastas com nanossílica não sonicada e sem superplastificante apresentaram praticamente o mesmo volume de poros da pastas de referência e as pastas com nanossílica não sonicada e com superplastificante apresentaram um volume de poros levemente menor. Para o caso das pastas com adição de nanossílica sonicada, tanto com quanto sem superplastificante, o volume de poros se apresentou um pouco acima do observado na pasta de referência.

Figura 34: Distribuição dos diâmetros dos poros (20 - 100 nm)



Fonte: AUTORA

Em se tratando da área superficial da nanossílica, $640 \text{ m}^2/\text{g}$, quando se compara esta com as da literatura, que varia de 15 a $345 \text{ m}^2/\text{g}$, pode-se notar que a mesma é muito maior, sendo que a não influência na resistência à compressão dos corpos de prova é possivelmente devido à saturação, isto é, o teor de nanossílica usado foi maior que o necessário para causar melhoras.

5 Sugestões para futuros trabalhos

Como sugestões para próximos trabalhos fica a possibilidade de usar menores teores de nanossílica, devido à altíssima área superficial da mesma utilizada, e outras formas de dispersão - em suspensão com um agente que impeça que a nanossílica se aglomere, por exemplo.

Seria interessante também, medir a reatividade de nanossílica com hidróxido de cálcio para estimar um teor “ideal” e medir a área superficial da nanossílica pra ver se esta está aglomerada.

Conclusão

Pode-se observar que nas pastas com nanossílica e sem superplastificante a nanossílica acelera a hidratação do cimento, mas isto não implica em grandes variações de resistência à compressão dos corpos de prova. Também foi possível observar que a sonicação da nanossílica não tem efeito.

Nas pastas com nanossílica e com superplastificante foi possível notar que este retarda um pouco a hidratação, se comparado com as pastas sem o seu uso, mas a influência da nanossílica em acelerar a hidratação prevalece. A sonicação faz com que haja uma maior demanda de superplastificante para obter a mesma consistência das pastas de referência, o que pode estar relacionado ao fato de que há mais superplastificante ligado à nanossílica, deixando menor quantidade para o cimento. Nesse caso a sonicação também não tem efeito.

Analisando os resultados ainda foi possível observar que a pasta com adição na forma de pó apresentou uma perda de trabalhabilidade de 36% e para que a abertura do tronco de cone fosse a mesma da pasta de referência precisou-se adicionar 0,09% de aditivo superplastificante. Já para a pasta com a adição de nanossílica sonicada em água, essa perda foi de 40% e precisou-se adicionar 0,10% de aditivo.

Analisando os dados de calorimetria observou-se que a adição de nanossílica diminui o período de indução, faz com que as curvas de aceleração sejam mais acentuadas e haja uma maior liberação de calor, que são os motivos de a nanossílica acelerar a hidratação do cimento.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade dinâmico, nenhuma mudança significativa foi observada.

Finalmente, analisando os resultados de resistência à compressão, foi possível notar que a aceleração da hidratação do cimento, observada na calorimetria, implicou em maiores resistências iniciais das amostras com nanossílica, principalmente aos 3 dias. Conforme a hidratação ocorria, esse ganho reduziu-se a quase zero aos 28 dias, no caso dos corpos de prova cilíndricos, e chegou a ser negativo em corpos de prova prismáticos. A menor resistência dos corpos de prova prismáticos, em relação aos cilíndricos, pode estar relacionada à tração que estes sofreram anteriormente, fazendo com que surgissem microfissuras que prejudicaram os mesmos.

Referências

- ABCP. *Uma breve história do cimento Portland*. 2009. [Acesso em 29 de novembro de 2014]. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland#.VHnU7THF91Z>>. Citado na página 19.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11578*: Cimento portland composto. Rio de Janeiro, 1991. 5 p. Citado na página 38.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215*: Cimento portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13279*: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 49, 50 e 51.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E1878*: Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio by impulse excitation of vibration. West Conshohocken, PA, 1999. Citado na página 48.
- AZEVEDO, N. H. de. *Incorporação de nanobastões de carbeto de silício em matrizes cimentícias*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Citado na página 44.
- BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciencia e Engenharia de Materiais: O cimento Portland no Brasil*. IBRACON: São Paulo: Geraldo C. Isaia, 2010. 776 p. Citado na página 24.
- BEEDLE, S. S.; GROVES, G. W.; RODGER, S. A. The effect of fine pozzolanic and other particles on the hydration of c_3s . *Advances in Cement Research*, v. 2, p. 3–8, 1989. Citado na página 33.
- BERRA, M. et al. Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, v. 35, p. 666–675, 2012. ISSN 09500618. Citado 4 vezes nas páginas 18, 34, 37 e 65.
- CIMENTO ITAMBÉ. *Relatórios de Ensaio - Dezembro 2014*. 2014. [Acesso em 06 Abril 2015]. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=368&chave=2014-12pro=368&chave=2013-12>>. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- Cimento.org. *O mundo do cimento*. 2008. [Acesso em 29 de novembro de 2014]. Disponível em: <<http://cimento.org/concreto/>>. Citado na página 21.
- CINCOTTO, M. A. *Concreto: Ciência e Tecnologia: Reações de hidratação e pozolânicas*. São Paulo, IBRACON: Geraldo Cechella Isaia, 2011. v. 1. 381-412 p. Citado 3 vezes nas páginas 26, 47 e 48.

Comércio de Perus. *História da fábrica de cimento*. 2008. [Acesso em 29 de novembro de 2014]. Disponível em: <<http://comerciodeperus.com/foto37f.htm>>. Citado na página 22.

CONSTANTINIDES, G.; ULM, F.-J. The nanogranular nature of C–S–H. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 55, n. 1, p. 64 – 90, 2007. Citado na página 29.

COSTOYA, M. et al. Proceedings of the 12th international congress on the chemistry of cement: Synthesis and hydration of tricalcium silicate. Montreal, Canada, 2007. Citado na página 26.

Escola de Engenharia UFF. *História do cimento*. 2006. [Acesso em 29 de novembro de 2014]. Disponível em: <http://www.uff.br/matconst/historia_do_cimento1.htm>. Citado na página 20.

FAESA. *Processo de Produção do Cimento*. 2009. [Acesso em 29 de novembro de 2014]. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/OMonitor/processo-de-producao-do-cimento>>. Citado na página 23.

GAITERO, J. J.; CAMPILLO, I.; GUERRERO, a. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 8-9, p. 1112–1118, 2008. ISSN 00088846. Citado 3 vezes nas páginas 18, 30 e 35.

GARTNER, E. M. et al. *Structure and Performance of Cements*: Hydration of portland cement. J. bensted, p. barnes. [S.l.]: Taylor & Francis, 2002. 57-113 p. Citado na página 33.

GLEIZE, P. J. P. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*: Nanotecnologia e materiais de construção. São Paulo, IBRACON: Geraldo Cechella Isaia, 2007. v. 2. 1659-1685 p. Citado na página 31.

GLEIZE, P. J. P. *Concreto: Ciência e Tecnologia*: Nanociência e nanotecnologia dos materiais cimentícios. São Paulo, IBRACON: Geraldo Cechella Isaia, 2011. v. 2. 1871-1881 p. Citado na página 31.

GOLDONI, A. G. *Resistência à flexão e compressão em geopolímero com incorporação de nanotubos de carbono*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Citado na página 44.

HIELSCHER, T. Ultrasonic production of nano-size dispersions and emulsions. In: . Paris, France: ENS'05, 2005. p. 138–143. Citado na página 43.

JIANG, J.; OBERDÖRSTER, G.; BISWAS, P. Characterization of size, surface charge, and agglomeration state of nanoparticle dispersions for toxicological studies. *Journal of Nanoparticle Research*, Springer Netherlands, v. 11, n. 1, p. 77–89, 2009. ISSN 1388-0764. Citado na página 43.

JOLICOEUR, C.; SIMARD, M.-A. Chemical admixture-cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts. *Cement and Concrete Composites*, v. 20, n. 2–3, p. 87 – 101, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

KONDO, R.; UEDA, S. Kinetics and mechanisms of the hydration of cements. Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, II, Hydration of Cements, Tokyo, Japan, v. 2, p. 203–212, 1968. Citado na página 36.

- KONG, D. et al. Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, v. 37, p. 707–715, 2012. ISSN 09500618. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.006>>. Citado na página 68.
- KONG, D. et al. Influence of nano-silica agglomeration on fresh properties of cement pastes. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, v. 43, p. 557–562, 2013. ISSN 09500618. Citado na página 60.
- KORPA, A.; KOWALD, T.; TRETTIN, R. Hydration behaviour, structure and morphology of hydration phases in advanced cement-based systems containing micro and nanoscale pozzolanic additives. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 7, p. 955–962, 2008. ISSN 00088846. Citado na página 33.
- Laboratório de Microestrutura - LME. *Departamento de Engenharia de Construção Civil*. Escola Politécnica - USP, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- LEGRAND, C.; WIRQUIN, E. Study of the strength of very young concrete as a function of the amount of hydrates formed—influence of superplasticizer. *Materials and Structures*, Kluwer Academic Publishers, v. 27, n. 2, p. 106–109, 1994. ISSN 1359-5997. Citado na página 36.
- LI, H. et al. Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, v. 35, n. 2, p. 185–189, 2004. ISSN 13598368. Citado na página 37.
- LI, H.; ZHANG, M. hua; OU, J. ping. Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. *International Journal of Fatigue*, v. 29, n. 7, p. 1292 – 1301, 2007. Citado na página 37.
- MADANI, H.; BAGHERI, A.; PARHIZKAR, T. The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, v. 42, n. 12, p. 1563–1570, 2012. ISSN 00088846. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 58.
- MANDZY, N.; GRULKE, E.; DRUFFEL, T. Breakage of tio2 agglomerates in electrostatically stabilized aqueous dispersions. *Powder Technology*, v. 160, n. 2, p. 121 – 126, 2005. ISSN 0032-5910. Citado na página 43.
- MEHTA, P.; MANMOHAN, D. In: *Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements*. Paris: [s.n.], 1980. v. 3. Citado na página 31.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI, 1994. 57 p. Citado na página 46.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete - Microstructure, Properties and Materials: Microstructure of the Hydrated Cement Paste*. 3rd. ed. USA: McGraw-Hill Companies, Inc., 2005. 30-32 p. Citado na página 30.
- N&AM. *NANOSTRUCTURED & AMORPHOUS MATERIALS, INC*: Material safety data sheet. 2008. [Acesso em 07 Abril 2015]. Disponível em: <http://www.nanoamor.com/msds/msds_SiO2_4850MR.pdf>. Citado na página 40.

- NAZARI, A.; RIAHI, S. The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier Ltd, v. 42, n. 3, p. 570–578, 2011. ISSN 13598368. Citado 3 vezes nas páginas 18, 35 e 36.
- NEVILLE, A. M. 2sd. ed. São Paulo: PINI, 1997. 108-118, 325-326 p. Citado na página 46.
- ODLER, I. *Hydration, Setting and Hardening of Portland cement*. New York: Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 1053 p. Citado na página 26.
- OLTULU, M.; ŞAHİN, R. Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume. *Materials Science and Engineering A*, v. 528, n. 22-23, p. 7012–7019, 2011. ISSN 09215093. Citado na página 18.
- PARK, B. S.; SMITH, D. M.; THOMA, S. G. Determination of agglomerate strength distributions, part 4. analysis of multimodal particle size distributions. *Powder Technology*, v. 76, n. 2, p. 125 – 133, 1993. Citado na página 43.
- PORRO, A. et al. *Proceedings of Applications of Nanotechnology in Concrete Design: Effects os nanosilica additions on cement pastes*. [S.l.]: R.K. Dhir, M.D. Newlands, L.J. Csetenyi (Eds.), 2005. 87–96 p. Citado na página 35.
- POWERS, T. C. Structure and physical properties of hardened portland cement paste. *Journal of the American Ceramic Society*, Blackwell Publishing Ltd, v. 41, n. 1, p. 1–6, 1958. Citado na página 26.
- QING, Y. et al. Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 3, p. 539–545, 2007. ISSN 09500618. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 35.
- RANGEL, R. N. *Coloides: um estudo introdutório*. São Paulo: LCTE, 2006. 168 p. Citado na página 31.
- RHEOSET. *Soluções em Concreto e Produtos para a Construção Civil: Ficha de informações de segurança de produtos químicos*. 2010. [Acesso em 07 Abril 2015]. Disponível em: <<http://www.rheoset.com.br/hotsite/fispqs/TECFLOW8000.pdf>>. Citado na página 41.
- RICHARDSON, I.; GROVES, G. Models for the composition and structure of calcium silicate hydrate (c-s-h) gel in hardened tricalcium silicate pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 22, n. 6, p. 1001 – 1010, 1992. Citado na página 30.
- SENFF, L. et al. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, v. 23, n. 7, p. 2487–2491, 2009. ISSN 09500618. Citado na página 32.
- SHIH, J. Y.; CHANG, T. P.; HSIAO, T. C. Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite. *Materials Science and Engineering A*, v. 424, n. 1-2, p. 266–274, 2006. ISSN 09215093. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 35.

- STEIN, H. N.; STEVELS, J. M. Influence of silica on the hydration of 3 cao,sio₂. *Journal of Applied Chemistry*, John Wiley & Sons, Ltd, v. 14, n. 8, p. 338–346, 1964. ISSN 1934-998X. Citado na página 33.
- TAUROZZI, J. S.; HACKLEY, V. A.; WIESNER, M. R. Ultrasonic dispersion of nanoparticles for environmental, health and safety assessment – issues and recommendations. *Nanotoxicology*, v. 5, n. 4, p. 711–729, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- TAYLOR, H. *Cement Chemistry*. London: Academic Press, 1990. Citado na página 29.
- TAYLOR, H. *Cement Chemistry*. London: Academic Press, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- TAYLOR, H. *Cement Chemistry*. London: Thomas Telford, 1997. Citado na página 29.
- TAYLOR, H. F. Proposed structure for calcium silicate hydrate gel. *Journal of the American Ceramic Society*, Blackwell Publishing Ltd, v. 69, n. 6, p. 464–467, 1986. Citado na página 30.
- THOMAS, J. J.; JENNINGS, H. M.; CHEN, J. J. Influence of nucleation seeding on the hydration mechanisms of tricalcium silicate and cement. *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 113, n. 11, p. 4327–4334, 2009. Citado na página 60.
- THUADAIJ, N.; NUNTIYA, A. Synthesis and characterization of nanosilica from rice husk ash prepared by precipitation method. *J. Nat. Sci. Special Issue on Nanotechnology*, v. 7, n. 1, p. 59–65, 2008. Citado na página 35.
- WU, Z.-Q.; YOUNG, J. The hydration of tricalcium silicate in the presence of colloidal silica. *Journal of Materials Science*, Kluwer Academic Publishers, v. 19, n. 11, p. 3477–3486, 1984. ISSN 0022-2461. Citado na página 33.
- ZACHARIAH, M. R.; CARRIER, M. J. Molecular dynamics computation of gas-phase nanoparticle sintering: a comparison with phenomenological models. *Journal of Aerosol Science*, v. 30, n. 9, p. 1139 – 1151, 1999. ISSN 0021-8502. Citado na página 43.

Apêndices

APÊNDICE A – Quadro-resumo com alguns
resultados da literatura que mostram o efeito
da adição de nanossílica em materiais
cimentícios

Quadro 1: Alguns resultados da literatura (AUTORA).

Autores	Tipo material Relação a/c	Teor de nanossílica (%)	Forma da nS	Modo de preparo	Diâmetro (nm)	Área superficial (m²/g)	Aditivo	Teor de aditivo (%)	Resistência à compressão	Resistência à flexão	Outros resultados
Hui Li , Hui-gang Xiao, Jie Yuan, Jinping Ou (2004)	Argamassa a/s=0,50	3, 5 e 10	Pó	nS adicionada na água, já com aditivo diluído, e misturada mecanicamente por 2 min	15	15	Redutor de água e antiespuma	1,51; 2,49 e 5,00% (redutor de água)	+26% (10% de nS) 29,9 MPa -> 36,4 MPa	+27% (10% de nS) 4,9 MPa -> 6,2 MPa	nS promove hidratação e melhora a microestrutura das pastas de cimento, se uniformemente dispersa
Jeng-Ywan Shih, Ta-Peng Chang , Tien-Chin Hsiao (2006)	Pasta 0,55	0,2; 0,4; 0,6 e 0,8	Líquida	-	20	-	Não contém	-	+39% (0,6% de nS) 36 MPa -> 50 MPa	-	estrutura mais densa com nS; aumenta volume de poros menor que 10 nm e diminui volume de poros maior que 10 nm
Ye Qing, Zhang Zenan, Kong Deyu, Chen Rongshen (2007)	Pasta a/s = 0,22	1, 2, 3 e 5	Pó	nS misturada a seco com cimento e depois adicionava água	15	160	Superplastificante	0,025	+25% (5% de nS) 79,2 MPa -> 98,8 MPa	-	nS acelera a hidratação do cimento e deixa as pastas mais viscosas; melhora a interface pasta-agregado
J.J. Gaitero, I. Campillo , A. Guerrero (2008)	Pasta 0,40	6	3 coloides e 1 em pó	coloides eram misturados 5 min com água antes de colocar o cimento; pó era misturado 1 min com o cimento depois colocava a água	30, 20, 120 e 1400*	-	Estabilizante****	-	+30% (30 nm) 67 MPa -> 87 MPa	-40% (20 nm) 10 MPa -> 6 MPa + 20% (pó) 10 MPa -> 12 MPa**	nS reduz a porosidade; modifica a estrutura interna do gel de C-S-H (aumento do comprimento das cadeias de silicato) -> menor lixiviação de cálcio; coloides melhor do que pó
Alireza Naji Givi, Suraya Abdul Rashid, Farah Nora A. Aziz, Mohamad Amran Mohd Salleh (2011)	Concreto a/s=0,40	0,5; 1,0; 1,5 e 2,0	Pó	misturada com água em alta velocidade por 1 min	15	160	Não contém	-	+59% (2,0% de nS) 35,4 MPa -> 56,2 MPa	+76% (2,0% de nS) 4,1 MPa -> 7,2 MPa	+ 167% na tração por compressão diametral (1,5 MPa - 4,0 MPa); menores tempos de início de pega
Ali Nazari , Shadi Riahi (2011)	Concreto a/s=0,40	1, 2, 3, 4 e 5	Pó	nS misturada com água, com o aditivo já diluído, em alta velocidade por 3 min	15	165	Superplastificante com agente antiespuma***	1,0	+74% (4,0% de nS) 31,6 MPa -> 55,1 MPa	+64% (4,0% de nS) 4,2 MPa -> 6,9 MPa	+ 119% na tração por compressão diametral (1,6 MPa - 3,5 MPa); nS acelera a formação dos produtos hidratados e melhora a estrutura dos poros
Meral Oltulu, Remzi Sahin (2011)	Argamassa -	0,5; 1,25 e 2,5	Pó	Antiespuma e nS são adicionados em 3/5 da água e misturados por 5 min em alta velocidade	12	200	Superplastificante e antiespuma	0,75 e 1,0	+12% (1,25% de nS) 56,9 MPa -> 63,6 MPa -43% (2,5% de nS) 56,9 MPa -> 32,2 MPa	-	nS aumenta a permeabilidade capilar com 2,5% -> teor ótimo de 1,25% (aumenta resistência e diminui permeabilidade capilar)

Quadro 1 - continuação: Alguns resultados da literatura (AUTORA).

Autores	Tipo material Relação a/c	Teor de nanossílica (%)	Forma da nS	Modo de preparo	Diâmetro (nm)	Área superficial (m ² /g)	Aditivo	Teor de aditivo (%)	Resistência à compressão	Resistência à flexão	Outros resultados
M. Berra, F. Carassiti, T. Mangialardi, A. E Paolini, M. Sebastiani (2012)	Pasta Variável	0,8 e 3,8	Gel	nS misturada com água antes da adição do cimento	10	345	Estabilizante**** e Superplastificante	0,23 (0,8% de nS); 1,00 e 1,32 (3,8% de ns, diferentes a/c)	+17,4 (3,8% de nS) 49,4 MPa -> 58 MPa	-	obs.: a maior parte do ganho da resistência à compressão foi atribuído ao uso de superplastificante
Deyu Kong, Xiangfei Du, Su Wei, Hua Zhang, Yang Yang, Surendra P. Shah (2012)	Pasta e argamassa 0,30	0,25; 0,50; 0,75 e 1,00	Precipitada	-	20-30	157,8	Superplastificante	0,75	+12% (1,0% de nS) 48 MPa -> 54 MPa	-	nS melhora a microestrutura; o volume de macroporos acima de 5 µm é reduzido e o de 20 a 100 nm é levemente menor; diminui a lixiviação de cálcio
Hesam Madani, Alireza Bagheri , Tayebbeh Parhizkar (2012)	Pasta a/s = 0,27	1, 2, 3, 4, 5 e 7,5 (30 nm); 1, 2, 3 e 5 (15 nm); 1, 2 e 3 (9 nm)	Hidrossol	-	30, 15 e 9	100, 200 e 300	Não contém	-	-	-	Quanto maior a área superficial da nS maior é o consumo de cal; nS reduz o início de pega, quanto maior a área e o teor, menor é esse tempo; reduz a diferença entre início e fim de pega; acelera o processo de hidratação no 1º dia, depois de 7 dias o grau de hidratação é menor
Deyu Kong, Yong Su, Xiangfei Du, Su Wei, Yang Yang, Surendra P. Shah (2013)	Pasta 0,30 e 0,40	1	Precipitada	-	20-30	157,8	Superplastificante	0,5	-	-	Os grandes aglomerados aceleram mais o processo de hidratação do cimento e consomem mais cálcio do que menores aglomerados
Meral Oltulu, Remzi Sahin (2014)	Argamassa -	0,5; 1,25 e 2,5	Pó	Antiespuma e nS são adicionados em 3/5 da água e misturados por 5 min em alta velocidade	12	200	Superplastificante e antiespuma	0,75 e 1,0	-	-	A adição de 2,5% de nanossílica aumenta o volume de poros e diminui a área superficial, aumenta a quantidade de poros maior que 10 nm - teor ótimo de 1,25%

Obs.: As resistências mecânicas correspondem aos 28 dias;

a/s = água/sólidos;

* Aglomerado; tamanho da partícula = 15 nm;

** O teste foi feito com apenas 3 amostras;

*** Um aditivo, nos outros casos são aditivos diferentes;

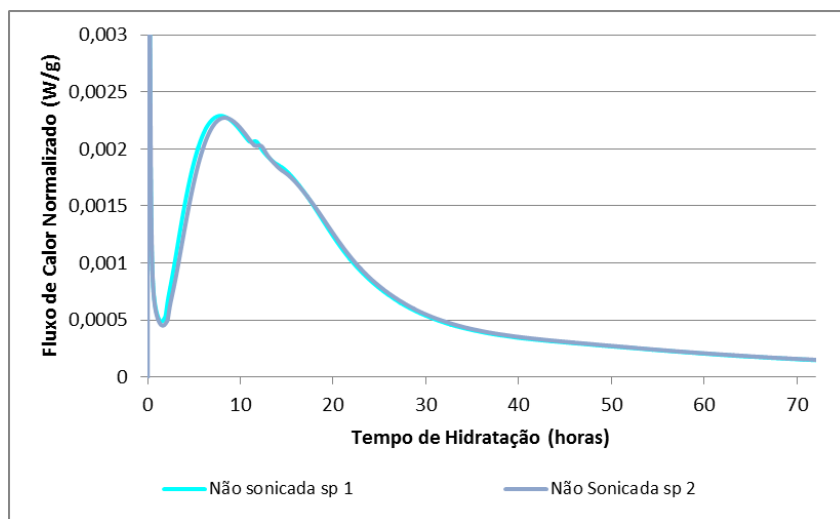
**** Estabilizante já vinha com a nS.

APÊNDICE B – Calorimetria

B.1 Pasta de referência

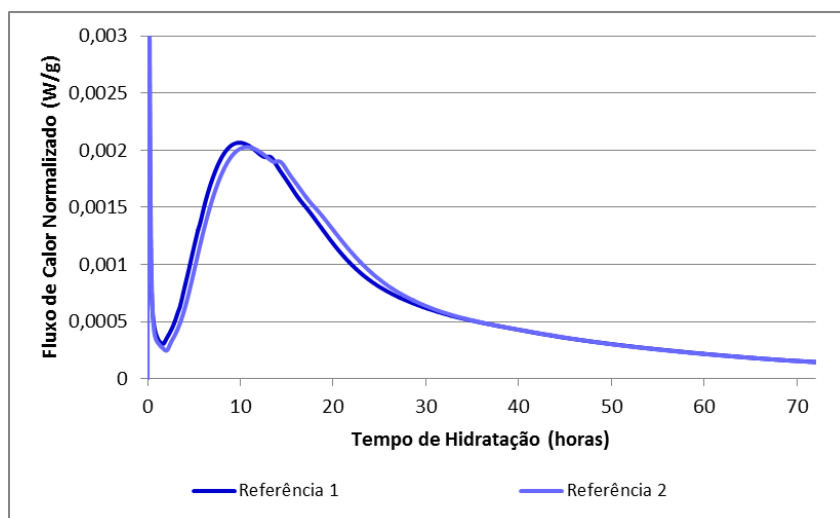
B.2 Pasta com adição de 2,5% de nanossílica não sonicada e com superplastificante

Figura 37: Fluxo de Calor das pastas com adição de nanossílica não sonicada e com superplastificante



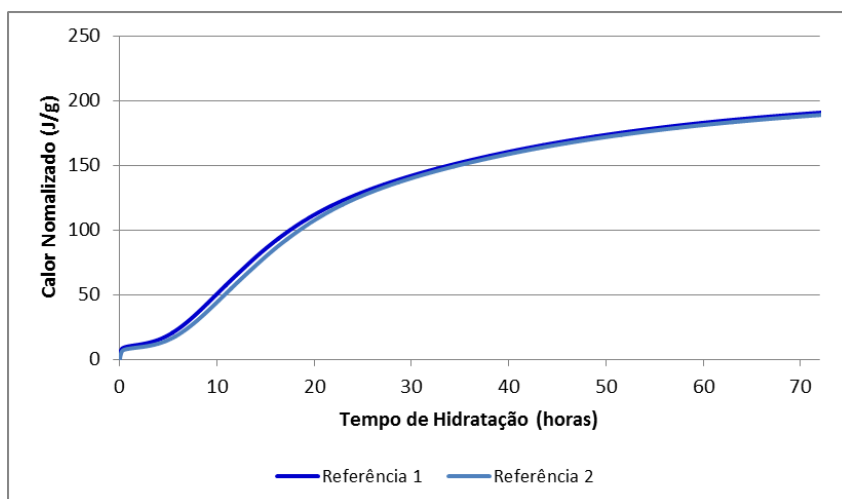
Fonte: AUTORA

Figura 35: Fluxo de Calor das pastas de referência



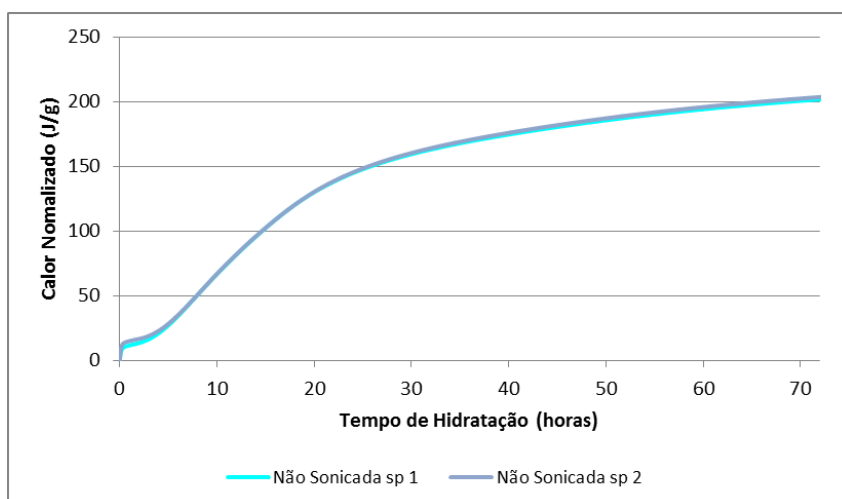
Fonte: AUTORA

Figura 36: Curvas de Calor Total Liberado na hidratação das pastas de referência



Fonte: AUTORA

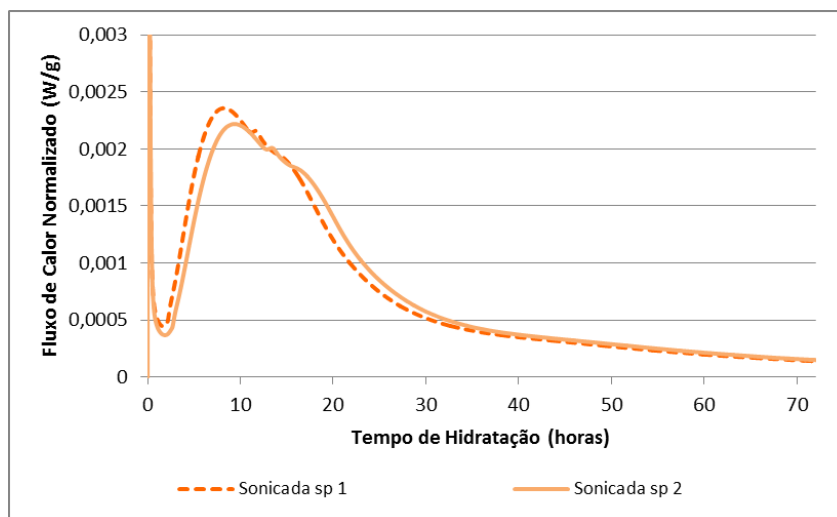
Figura 38: Curvas de Calor Total Liberado na hidratação das pastas com adição de na-nossílica não sonicada e com superplastificante



Fonte: AUTORA

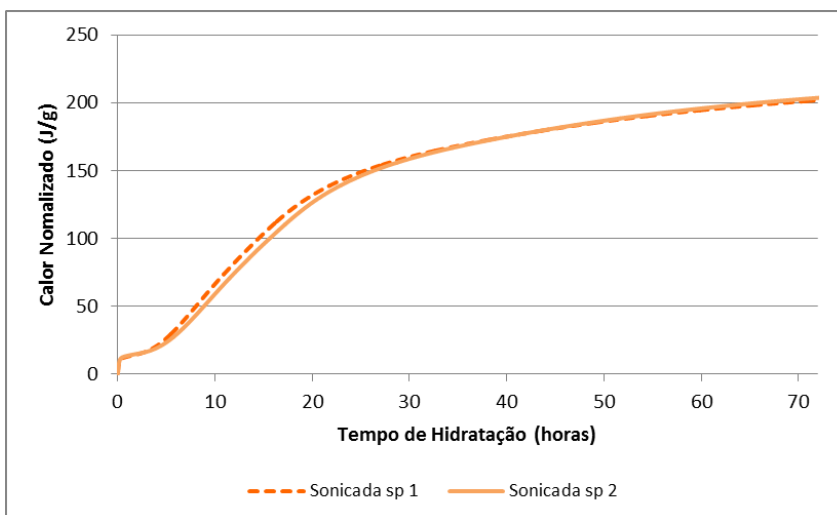
B.3 Pasta com adição de 2,5% de nanossílica sonicada e com superplastificante

Figura 39: Fluxo de Calor das pastas com adição de nanossílica sonicada e com superplastificante



Fonte: AUTORA

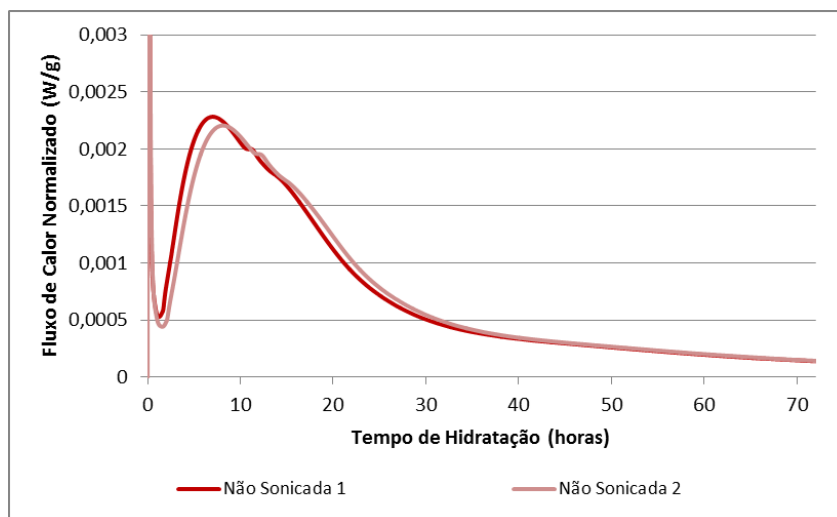
Figura 40: Curvas de Calor Total Liberado na hidratação das pastas com adição de nanossílica sonicada e com superplastificante



Fonte: AUTORA

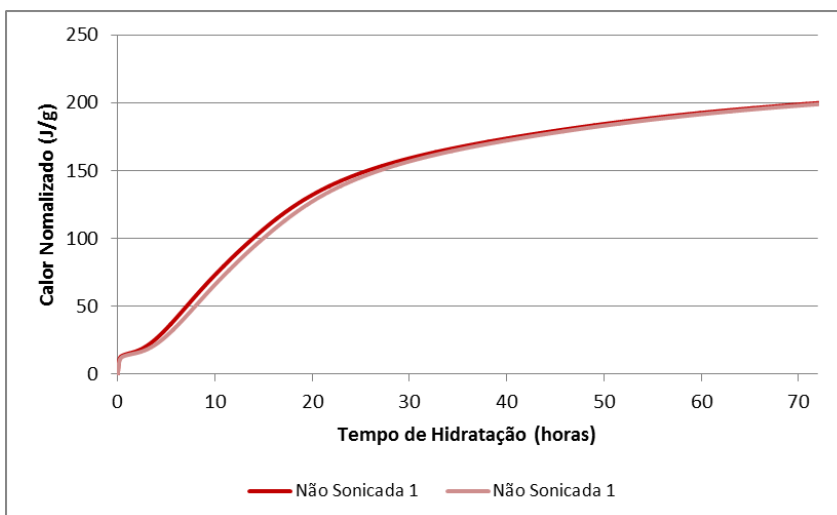
B.4 Pasta com adição de 2,5% de nanossílica não sonicada e sem superplastificante

Figura 41: Fluxo de Calor das pastas com adição de nanossílica não sonicada e sem superplastificante



Fonte: AUTORA

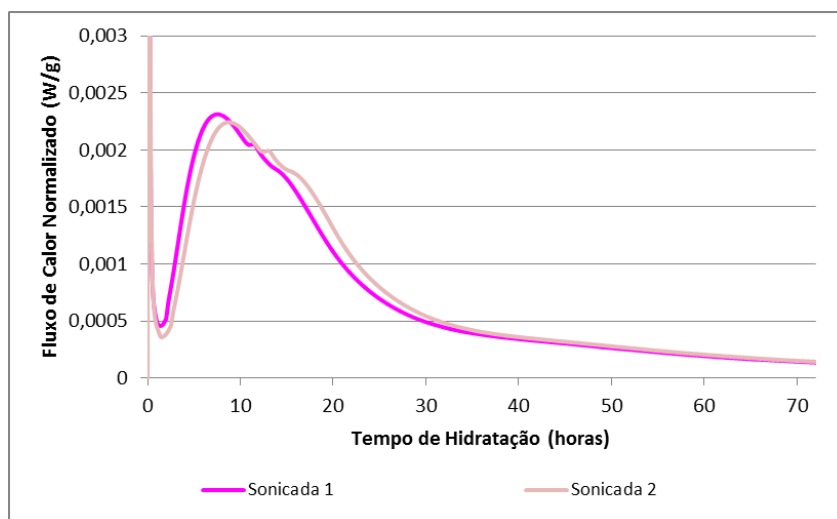
Figura 42: Curvas de Calor Total Liberado na hidratação das pastas com adição de nanossílica não sonicada e sem superplastificante



Fonte: AUTORA

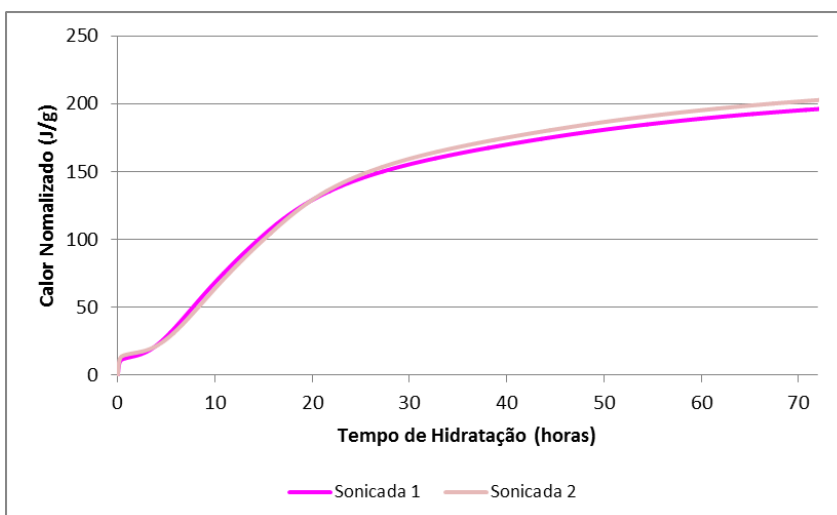
B.5 Pasta com adição de 2,5% de nanossílica sonicada e sem superplastificante

Figura 43: Fluxo de Calor das pastas com adição de nanossílica sonicada e sem superplastificante



Fonte: AUTORA

Figura 44: Curvas de Calor Total Liberado na hidratação das pastas com adição de nanossílica sonicada e sem superplastificante



Fonte: AUTORA

APÊNDICE C – Módulo de Elasticidade Dinâmico

C.1 3 dias

Tabela 12: Módulo de Elasticidade Dinâmico aos 3 dias

Lote	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)					Média	Média total	Desvio Padrão
Referência	16,45	16,46	16,30	16,24	-	16,36	15,54	0,89
	16,43	16,39	16,52	16,25	16,58	16,43		
	17,12	17,13	17,25	17,03	17,01	17,11		
	15,32	15,24	15,29	15,14	15,24	15,25		
	15,00	15,28	15,05	14,99	14,89	15,04		
	15,57	15,13	15,38	15,20	15,36	15,33		
	14,73	14,86	14,85	14,88	14,75	14,81		
	14,35	14,20	14,30	14,59	14,32	14,35		
	15,24	15,22	15,09	15,07	15,15	15,15		
Não Sonicada sp	16,07	16,28	16,08	16,00	16,03	16,09	15,83	0,34
	15,85	15,75	15,99	15,99	15,89	15,89		
	15,91	15,98	15,94	15,98	15,80	15,92		
	16,15	16,21	16,60	16,52	16,46	16,39		
	15,39	15,27	15,27	15,22	15,28	15,29		
	16,10	16,01	16,12	16,02	15,96	16,04		
	15,60	15,49	15,46	15,57	15,54	15,53		
	15,60	15,86	15,61	15,72	15,62	15,68		
	15,56	15,58	15,77	15,47	15,60	15,60		
Sonicada sp	15,82	15,81	15,79	15,80	15,97	15,84	16,00	0,47
	15,91	15,77	15,89	15,87	15,83	15,85		
	15,73	16,24	16,08	16,15	16,04	16,05		
	16,64	16,30	16,21	16,62	16,47	16,45		
	16,87	16,80	16,71	16,86	16,74	16,80		
	16,61	16,43	16,22	16,43	16,42	16,42		
	15,71	15,34	15,78	15,48	15,49	15,56		
	15,66	15,80	15,54	15,70	15,66	15,67		
	15,37	15,13	15,33	15,46	15,51	15,36		
Não Sonicada	16,10	16,04	16,00	16,05	16,09	16,06	15,86	0,30
	16,12	16,14	16,03	16,14	16,12	16,11		
	15,98	16,01	15,92	15,99	15,82	15,94		
	16,01	15,58	15,93	15,41	15,40	15,67		
	16,03	15,88	15,85	16,06	15,79	15,92		
	15,90	15,90	15,66	16,05	15,85	15,87		
	15,42	15,43	15,45	15,55	15,24	15,42		
	16,56	16,32	16,35	16,22	16,23	16,34		
	15,36	15,51	15,62	15,37	15,39	15,45		
Sonicada	16,53	16,32	16,62	16,66	16,49	16,52	16,31	0,34
	16,76	16,57	16,68	16,36	16,25	16,52		
	16,00	15,97	15,70	15,71	15,93	15,86		
	16,48	16,14	16,45	16,30	16,38	16,35		
	16,60	16,87	16,74	16,87	16,86	16,79		
	15,63	15,66	15,74	15,70	15,71	15,69		
	16,43	16,13	16,20	16,33	16,25	16,27		
	16,28	16,20	16,35	16,39	16,07	16,26		
	16,56	16,52	16,51	16,43	16,46	16,50		

C.2 7 dias

Tabela 13: Módulo de Elasticidade Dinâmico aos 7 dias

Lote	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)					Média	Média total	Desvio Padrão
Referência	18,71	18,56	18,66	18,39	18,78	18,62	18,42	0,88
	19,67	19,37	19,39	19,23	19,38	19,41		
	17,74	17,84	17,47	18,15	17,57	17,75		
	18,64	18,46	18,60	18,64	18,52	18,57		
	17,28	16,98	17,18	17,30	17,26	17,20		
	17,55	17,42	17,57	17,69	17,60	17,57		
	16,72	16,57	16,61	16,70	16,50	16,62		
	18,10	17,81	18,21	18,27	18,21	18,12		
	18,36	18,14	18,16	18,07	18,37	18,22		
	19,50	19,40	19,49	19,63	19,72	19,55		
	19,09	18,84	18,87	19,06	19,05	18,98		
	19,48	19,76	19,59	19,72	19,57	19,62		
	19,14	18,73	18,88	19,30	19,06	19,02		
	18,08	18,33	18,14	18,20	18,01	18,15		
	18,88	18,90	18,90	19,06	19,04	18,96		
Não Sonicada sp	18,49	18,53	18,64	18,49	18,41	18,51	18,83	0,69
	19,00	18,90	19,02	18,89	18,85	18,93		
	18,95	18,95	19,00	18,94	18,93	18,95		
	20,13	19,81	19,93	19,91	19,82	19,92		
	19,52	19,37	19,52	19,50	19,37	19,46		
	19,93	20,03	19,88	19,85	19,82	19,90		
	18,57	18,97	19,09	18,99	19,02	18,93		
	18,43	18,61	18,64	18,32	18,50	18,50		
	17,55	17,41	17,48	17,50	17,54	17,50		
	18,82	18,82	18,84	19,04	18,88	18,88		
	17,88	17,68	17,51	17,61	17,73	17,68		
	18,64	18,56	18,46	18,56	18,76	18,60		
	18,58	18,50	18,41	18,36	18,20	18,41		
	19,67	19,41	19,40	19,31	19,33	19,42		
	19,00	18,71	18,71	18,98	19,15	18,91		
Sonicada sp	20,33	20,63	20,33	20,01	20,23	20,31	19,59	0,47
	19,91	19,50	20,01	19,93	20,00	19,87		
	20,12	20,30	20,17	20,25	20,16	20,20		
	19,87	19,68	20,15	20,14	19,85	19,94		
	19,40	19,89	19,44	19,40	19,51	19,53		
	18,52	18,53	18,53	18,67	18,53	18,56		
	19,41	19,26	19,57	19,15	19,17	19,31		
	19,64	19,66	19,94	19,99	19,76	19,80		
	19,45	19,50	19,53	19,56	19,53	19,51		
	19,46	19,20	19,33	19,48	19,26	19,35		
	19,24	19,23	19,28	19,48	19,40	19,33		
	19,51	19,36	19,38	19,36	19,32	19,39		
Não Sonicada	17,96	17,81	17,72	17,75	17,9	17,83	18,78	0,53
	18,06	18,01	18,20	18,04	18,15	18,09		
	18,43	18,42	18,38	18,60	18,42	18,45		
	19,17	19,37	19,19	19,04	19,14	19,18		
	18,88	18,85	18,99	18,95	18,95	18,92		
	19,24	19,24	19,16	19,02	19,28	19,22		
	19,38	19,26	19,29	19,08	19,13	19,23		
	18,97	19,17	18,92	18,99	19,09	19,03		
	19,34	19,00	18,98	18,93	19,13	19,08		
Sonicada	19,24	19,12	18,98	19,06	19,16	19,11	18,89	0,25
	18,94	18,9	18,79	18,73	18,85	18,84		
	19,08	18,93	18,99	18,99	18,78	18,95		
	19,16	19,02	19,21	19,08	19,12	19,12		
	19,08	19,12	19,1	19,04	19,09	19,09		
	18,89	18,86	18,63	18,82	18,75	18,79		
	19,09	19,00	19,08	19,01	18,95	19,03		
	18,72	18,75	18,89	18,72	18,7	18,76		
	18,26	18,49	18,27	18,28	18,34	18,33		

C.3 28 dias

Tabela 14: Módulo de Elasticidade Dinâmico aos 28 dias

Lote	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)						Média	Média total	Desvio Padrão
Referência	20,10	19,98	20,10	20,03	20,00	20,04			
	21,16	21,24	20,94	21,3	20,99	21,13			
	21,53	21,23	21,59	21,49	21,48	21,46			
	21,46	21,39	21,33	21,41	21,34	21,39			
	20,54	21,10	21,17	21,12	21,05	21,00		21,77	0,93
	22,59	22,38	22,52	22,48	22,53	22,50			
	22,78	23,03	23,02	23,2	22,83	22,97			
	22,41	22,44	22,42	22,28	22,45	22,40			
	22,22	22,01	21,95	22	22,08	22,05			
	22,83	22,76	22,7	22,89	22,71	22,78			
Não Sonicada sp	20,02	20,13	20,01	20,08	20,03	20,05			
	19,92	19,98	20,07	19,91	19,98	19,97			
	19,77	19,8	19,5	19,86	19,99	19,78			
	21,67	21,56	21,69	21,65	21,52	21,62			
	21,43	21,43	21,25	21,26	21,39	21,35			
	21,77	21,87	21,67	21,81	21,78	21,78			
	22,36	22,09	22,06	22,01	22,25	22,15			
	21,77	21,61	21,4	21,56	21,47	21,56		21,00	0,86
	22,27	22,63	22,37	22,43	22,27	22,39			
	20,86	21,35	20,88	20,73	20,84	20,93			
	21,01	20,98	20,71	20,78	21,26	20,95			
	19,5	19,72	19,62	19,39	19,42	19,53			
	21,16	21,23	21,31	21,14	21,05	21,18			
	20,84	20,91	20,94	20,82	20,85	20,87			
	20,72	20,98	20,73	20,75	20,94	20,82			
Sonicada sp	20,56	20,54	20,73	20,79	20,71	20,67			
	21,09	20,97	21,28	21,25	21,14	21,15			
	20,94	20,85	20,73	20,80	20,78	20,82			
	21,04	21,14	21,09	21,00	21,16	21,09			
	21,44	21,23	21,47	21,33	21,35	21,36			
	21,01	20,91	21,09	20,96	21,05	21,00		20,97	0,24
	20,44	20,89	20,51	20,65	20,62	20,62			
	20,62	20,97	20,82	20,94	20,74	20,82			
	21,13	20,99	21,10	20,99	20,96	21,03			
	21,10	21,37	21,43	21,34	21,17	21,28			
	20,93	20,82	20,95	20,88	20,81	20,88			
Não Sonicada	20,69	20,54	20,82	20,71	20,84	20,72			
	20,34	20,6	20,59	20,52	20,54	20,52			
	19,95	20,87	20,46	20,69	20,81	20,56			
	20,88	20,74	20,74	20,41	20,6	20,67			
	20,48	20,49	20,54	20,39	20,38	20,46		20,75	0,39
	20,25	20,27	20,01	20,21	20,14	20,18			
	21,20	21,34	21,25	21,32	21,26	21,27			
	21,47	21,25	21,24	21,54	21,30	21,36			
	20,77	21,00	21,04	21,06	21,00	20,97			
	21,17	20,81	20,72	20,78	20,67	20,83			
Sonicada	21,26	21,23	21,09	21,13	21,19	21,18			
	20,88	20,50	20,44	20,65	-	20,62			
	20,91	21,13	20,88	20,85	20,92	20,94			
	21,08	21,18	20,79	21,16	21,02	21,05		20,84	0,23
	20,71	20,31	20,47	20,7	20,4	20,52			
	20,99	20,87	20,95	20,8	21,01	20,92			
	20,94	21,03	20,83	20,96	20,9	20,93			
	20,77	20,48	20,53	20,43	20,58	20,56			

APÊNDICE D – Resistência à Tração na Flexão

D.1 3 dias

Tabela 15: Resistência à Tração na Flexão aos 3 dias

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Referência	7,97	7,34	0,86
	8,87		
	7,72		
	6,99		
	6,52		
	5,94		
	6,94		
	7,64		
	7,48		
Não Sonicada sp	5,78	6,45	0,87
	5,52		
	5,69		
	5,75		
	7,37		
	6,57		
	6,29		
	8,00		
	7,09		
Sonicada sp	5,58	5,90	0,71
	6,91		
	6,19		
	5,79		
	6,21		
	4,45		
	5,52		
	6,56		
	5,87		
Não Sonicada	8,76	7,38	0,99
	7,97		
	7,63		
	6,21		
	7,41		
	6,28		
Sonicada	8,51	7,34	0,86
	8,07		
	7,37		
	7,98		
	6,02		
	7,24		
	7,20		
	6,29		

D.2 7 dias

Tabela 16: Resistência à Tração na Flexão aos 7 dias

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Referência	8,08	9,76	1,19
	9,28		
	8,84		
	9,26		
	10,90		
	10,29		
	10,95		
	8,72		
	11,54		
Não Sonicada sp	6,13	6,75	0,61
	6,49		
	7,37		
	6,58		
	5,76		
	6,97		
	7,93		
	6,52		
	6,79		
Sonicada sp	7,01	6,45	0,90
	7,91		
	6,74		
	5,62		
	6,13		
	5,90		
	6,87		
	5,60		
	6,67		
Não Sonicada	5,34	6,06	1,15
	7,77		
	5,08		
	4,75		
	6,86		
Sonicada	7,46	6,08	1,45
	6,13		
	4,04		
	4,34		
	7,70		
	7,09		
	5,95		
7,40			
6,03			

D.3 28 dias

Tabela 17: Resistência à Tração na Flexão aos 28 dias

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Referência	6,88	8,19	1,50
	7,28		
	10,02		
	7,78		
	6,21		
	6,85		
	9,43		
	9,19		
	10,09		
Não Sonicada sp	4,53	5,07	1,09
	4,98		
	5,78		
	4,42		
	5,78		
	4,25		
	4,32		
	7,44		
	4,14		
Sonicada sp	3,63	5,10	1,83
	7,53		
	4,53		
	3,33		
	2,92		
	5,92		
	7,67		
	5,26		
Não Sonicada	4,62	5,06	1,39
	5,28		
	5,14		
	4,38		
	7,52		
	3,37		
Sonicada	3,59	5,15	1,13
	4,53		
	7,03		
	5,24		
	5,50		
	5,87		
	4,32		

APÊNDICE E – Resistência à Compressão dos corpos de prova prismáticos

E.1 3 dias

Tabela 18: Resistência à Compressão dos corpos de prova prismáticos aos 3 dias

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Referência	27,17	26,79	3,04
	29,10		
	31,49		
	27,54		
	27,79		
	25,59		
	21,67		
	23,98		
Não Sonicada sp	29,02	30,50	2,49
	36,68		
	29,13		
	29,06		
	29,60		
	29,13		
	31,17		
	29,30		
Sonicada sp	31,36	33,48	2,67
	36,22		
	28,12		
	32,78		
	32,28		
	32,99		
	34,00		
	32,78		
Não Sonicada	34,59	33,16	3,22
	37,55		
	33,56		
	38,45		
	30,38		
	31,19		
	35,54		
	29,13		
Sonicada	36,69	34,00	2,85
	30,16		
	33,31		
	36,84		
	35,41		
	37,93		
	34,93		
	29,05		
	35,53		
	31,84		
	32,98		
	31,52		

E.2 7 dias

Tabela 19: Resistência à Compressão dos corpos de prova prismáticos aos 7 dias

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Referência	33,30	38,43	4,16
	43,49		
	38,91		
	36,63		
	30,60		
	34,09		
	35,93		
	41,16		
	38,51		
	44,33		
	42,10		
	38,94		
	41,54		
Não Sonicada sp	38,43	40,73	3,27
	45,68		
	39,49		
	46,94		
	42,34		
	37,75		
	43,12		
	39,08		
	41,18		
	36,59		
	38,32		
	37,58		
	43,04		
Sonicada sp	43,47	44,16	3,42
	45,76		
	46,92		
	49,96		
	46,26		
	43,61		
	39,18		
	43,09		
	38,66		
	44,68		
Não Sonicada	42,27	39,75	4,01
	47,22		
	36,88		
	36,89		
	36,25		
	34,64		
	39,51		
	41,29		
	42,75		
Sonicada	34,31	38,59	4,34
	32,02		
	34,85		
	36,03		
	40,89		
	40,50		
	42,53		
	44,39		
	41,78		

E.3 28 dias

Tabela 20: Resistência à Compressão dos corpos de prova prismáticos aos 28 dias

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Referência	50,13	55,40	5,15
	58,11		
	50,70		
	55,85		
	55,21		
	66,75		
	55,41		
	54,70		
	61,19		
	51,34		
	50,05		
Não Sonicada sp	46,56	47,35	4,20
	52,94		
	42,63		
	53,55		
	54,27		
	47,08		
	46,70		
	46,82		
	46,34		
	43,36		
	42,80		
Sonicada sp	42,35	51,73	4,56
	50,22		
	54,15		
	52,22		
	56,57		
	58,09		
	45,61		
	54,15		
	47,10		
	54,83		
	48,60		
Não Sonicada	46,01	52,83	3,15
	48,93		
	53,72		
	49,49		
	56,18		
	53,90		
Sonicada	56,80	49,79	4,73
	50,77		
	45,52		
	56,36		
	47,53		
	46,93		
	53,03		
	48,41		
	56,18		
	44,40		

APÊNDICE F – Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos

F.1 3 dias

Tabela 21: Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 3 dias

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Referência	20,21		
	26,64		
	30,75		
	30,05		
	28,34		
	25,92		
	29,03		
	24,60		
	30,61		
	33,43		
	24,85		
	32,89	28,22	3,33
	27,70		
	32,24		
	32,90		
	31,99		
	25,65		
	25,32		
	25,00		
	29,25		
	27,04		
	28,19		
	26,54		
Não sonicada sp	33,24		
	32,33		
	36,65		
	40,27		
	36,46		
	40,14		
	38,97		
	35,87		
	32,20		
	36,10	36,23	3,47
	34,81		
	36,92		
	37,99		
	38,34		
	44,56		
	31,60		
	35,55		
	30,26		
	36,05		

Tabela 22: Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 3 dias (continuação)

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Sonicada sp	38,89	36,15	3,55
	33,98		
	37,27		
	38,79		
	35,28		
	38,68		
	36,12		
	32,26		
	38,11		
	40,35		
	40,69		
	38,99		
	38,10		
	31,49		
	43,17		
	34,09		
	30,27		
	33,02		
	31,83		
	31,17		
37,97			
34,82			
Não Sonicada	32,66	33,64	2,60
	37,78		
	31,48		
	30,39		
	32,58		
	32,93		
	36,12		
	36,15		
	30,67		
	38,44		
	30,85		
	34,98		
	36,31		
	32,05		
	34,24		
	33,63		
30,64			
Sonicada	34,22	34,51	3,36
	33,00		
	30,59		
	32,30		
	35,19		
	31,92		
	31,00		
	42,54		
	41,38		
	32,66		
	33,20		
	35,95		
	36,68		
	35,81		
	33,45		
	37,46		
31,14			
32,66			

F.2 7 dias

Tabela 23: Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 7 dias

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Referência	46,89	47,43	5,72
	51,78		
	43,75		
	43,20		
	43,58		
	42,75		
	46,21		
	47,33		
	52,36		
	49,71		
	50,69		
	49,23		
	54,83		
	60,20		
	50,18		
	45,32		
	62,58		
	42,73		
	40,28		
	48,93		
	43,00		
	42,37		
	41,24		
	43,24		
	43,31		
Não sonicada sp	56,62	52,68	4,49
	59,86		
	46,60		
	55,21		
	57,37		
	52,46		
	51,13		
	58,18		
	55,76		
	55,89		
	52,77		
	54,74		
	59,24		
	47,24		
	46,44		
	45,17		
	53,04		
	54,74		
	47,28		
	51,48		
	48,03		
	49,62		

Tabela 24: Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 7 dias (continuação)

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Sonicada sp	60,82	59,07	4,23
	63,82		
	64,98		
	60,98		
	59,33		
	60,54		
	56,92		
	66,20		
	55,12		
	61,73		
	57,61		
	61,66		
	55,62		
	54,97		
	53,71		
	59,84		
	50,39		
Não Sonicada	55,45	51,09	5,47
	48,98		
	50,51		
	48,57		
	45,70		
	46,01		
	47,87		
	45,91		
	47,82		
	55,63		
	46,92		
	47,04		
	44,70		
	61,57		
	59,94		
	52,35		
	54,26		
	61,52		
	50,03		
Sonicada	43,81	47,52	4,97
	42,86		
	43,77		
	54,25		
	43,23		
	53,91		
	45,94		
	44,14		
	48,75		
	42,06		
	53,00		
	51,42		
	42,02		
	47,63		
	55,95		

F.3 28 dias

Tabela 25: Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Referência	67,45	61,94	4,93
	54,83		
	60,20		
	62,58		
	63,96		
	54,92		
	59,59		
	59,82		
	59,94		
	66,13		
	70,74		
	68,76		
	69,51		
	59,96		
	66,46		
	57,94		
	53,38		
	55,51		
	57,18		
	65,86		
	59,28		
	63,03		
	65,92		
	65,35		
	68,05		
	63,19		
	65,09		
	56,45		
	64,11		
	53,37		
	58,24		
	63,07		
	58,15		
	67,91		
Não Sonicada sp	66,04	61,17	2,99
	59,99		
	64,94		
	64,26		
	60,42		
	60,44		
	66,90		
	59,02		
	65,96		
	56,18		
	60,71		
	60,00		
	60,93		
	62,85		
	55,45		
	61,57		
	59,94		
	61,52		
	59,61		
	57,39		
	59,69		
	62,83		
	60,33		

Tabela 26: Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias (continuação)

Lote	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Sonicada sp	55,43	61,52	4,52
	61,39		
	62,60		
	58,95		
	63,54		
	60,55		
	59,05		
	65,69		
	61,61		
	61,23		
	63,23		
	70,57		
	70,18		
	54,28		
	63,69		
	58,62		
	69,75		
	61,67		
	53,95		
	61,76		
	59,54		
	56,86		
	60,78		
Não Sonicada	62,58	61,63	4,93
	62,24		
	62,73		
	68,03		
	52,70		
	64,70		
	62,21		
	59,68		
	67,13		
	67,84		
	52,33		
	64,61		
	64,53		
	58,57		
	62,69		
	53,55		
	69,03		
	55,44		
	64,93		
	57,03		
	61,89		
	61,43		
Sonicada	62,41	64,51	4,83
	58,67		
	60,45		
	69,45		
	61,76		
	59,54		
	56,86		
	60,78		
	66,72		
	62,29		
	66,23		
	72,79		
	71,84		
	68,49		
	65,83		
	68,03		